SÉRIE
DE LA GESTION
DE L'ÉNERGIE

12

À L'INTENTION
DES INDUSTRIES,
COMMERCES
ET INSTITUTIONS

Réseaux de distribution d'eau et d'air comprimé

Énergie, Mines et Ressources Canada
Energy, Mines and Resources Canada
Canada

PRÉFACE

L'art et la science de la gestion de l'énergie ont accompli des progrès remarquables au cours de la dernière décennie. La gestion de l'énergie est devenue une discipline sérieuse dans le cadre du processus de gestion de la plupart des entreprises qui connaissent le succès.

D'abord, au début des années 70, on a mis sur pied des programmes d'économie d'énergie afin de réduire la menace de pénurie d'énergie que pesait sur le Canada, de même que la dépendance du pays à l'endroit du pétrole étranger. Toutefois, la hausse vertigineuse des prix n'a pas tardé a donner une signification nouvelle à l'expression «économie d'énergie»: réduire le coût de l'énergie.

Nombre d'industries, de commerces et d'organismes publics ont relevé le défi et abaissé les coûts d'énergie jusque dans une proportion de 50%. On est ainsi arrivé à utiliser l'énergie de façon rationnelle, grâce à des mesures telles que des programmes d'information à l'intention du personnel, des moyens d'entretien plus à point, la simple élimination du gaspillage, et en mettant de l'avant des projets aptes à moderniser ou améliorer les installations et l'équipement.

Pour en arriver maintenant à économiser d'avantage l'énergie, il importe de mieux connaître la technologie et ses applications en plus d'avoir recours à des appareils à haut rendement énergétique.

A la demande du Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne, du Programme des groupes de travail sur la gestion de l'énergie dans les secteurs commercial et institutionnel, et d'associations professionnelles et commerciales intéressées, la Division de l'énergie industrielle du ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources a élaboré une série de modules techniques portant sur la gestion de l'énergie.

Ces manuels aideront les gestionnaires et le personnel d'exploitation à découvrir les possibilités de gestion de l'énergie dans leur cadre de travail. On y trouve une quantité de renseignements pratiques, notamment des équations mathématiques, des renseignements généraux sur des techniques éprouvées, ainsi que des exemples concrets d'économie d'énergie.

Pour obtenir de plus amples renseignements concernant les modules figurant dans la liste qui suit ou la documentation utilisée dans le cadre des ateliers, y compris les études de cas, veuillez écrire à l'adresse suivante:

Division de l'énergie industrielle
Direction des économies d'énergie
Ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources
580, rue Booth
Ottawa, Ontario
K1A OE4

Gestion de l'énergie et participation des employés
Évaluation de la consommation
Analyse financière énergétique
Compatibilité de la gestion énergétique
Récupération de la chaleur perdue
Isolation thermique des équipements
Éclairage
Électricité
Moteurs électriques économiseurs d'énergie
Combustion
Appareillage de chaufferie
Fours, sécheurs et fours de cuisson
Systèmes à vapeur et à condensat
Chauffage et refroidissement énergétique (Vapeur et eau)
Conditionnement de l'air
Refroidissement et pompes à chaleur
Réseaux de distribution d'eau et d'air comprimé
Ventilateurs et pompes
Compresseurs et turbines
Mesures et contrôles
Régulation automatique
Manutention des matériaux et transport sur place
Point de vue architectural
Accumulation thermique

Ministre des Approvisionnements
et Services Canada 1985
No. de cat. M91-6/12F
ISBN 0-662-93334-6

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
Objectifs	1
Contenu	1
NOTIONS DE BASE	3
Réseaux de distribution d'eau	3
Description des systèmes	3
Traitement de l'eau	4
Filtration	5
Traitement chimique	5
Tuyauterie	5
Charge statique	5
Perte de charge	6
Charge totale	6
Écoulement de l'eau dans les conduites	6
Perte de chaleur dans les conduites	7
Effets de l'isolation	7
Réseaux de distribution d'air comprimé	8
Écoulement de l'air dans les conduites	11
Analyse énergétique	12
Sommaire	12
APPAREILLAGE	15
Réseaux de distribution d'eau	15
Réseaux de distribution d'air comprimé	15
Composants des réseaux	16
POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE	17
Possibilités de maintenance	17

Exemples concrets de maintenance 17
1. Réparation de fuites 17
2. Contrôle des débits d'eau et d'air 18
3. Abaissement de la température de l'eau chaude 19
4. Arrêt des appareils 20
5. Contrôle du traitement de l'eau 20
6. Programme de maintenance des filtres 21
7. Calibrage des appareils de contrôle et de régulation 21
8. Boyaux et raccords 22
9. Fonctionnement et maintenance des graisseurs automatiques à l'air 22

Possibilités d'amélioration de coût modique 23

Exemples concrets d'améliorations de coût modique 23
1. Isolation à la surface des réservoirs 23
2. Régulateurs de débit 23
3. Revue des besoins de pompage 25
4. Pompes à haut rendement 27

Possibilités de rénovation 28

Exemples concrets de rénovation 30
1. Récupération de la chaleur des eaux usées 30
2. Diminution de la consommation d'air 32
3. Éliminateurs de brouillard dans les tours de refroidissement 33
4. Sécheurs d'air comprimé 33
5. Conduites de plus faible perte de charge par frottement 33
6. Isolation de la tuyauterie 33
7. Système de refroidissement en circuit fermé (avec recyclage) 34
8. Pompes de surpression 34
9. Filtres de faible perte de charge 37
10. Traitement de l'eau en usine 37
11. Réservoir tampon pour réseaux d'air comprimé 37
12. Compresseurs d'air à haut rendement 37
13. Réservoirs de dilatation pour les réseaux de distribution d'eau 37
14. Diminution des pertes de charge 38

ANNEXES

A Glossaire
B Tables
C Conversions courantes
D Feuilles de travail

INTRODUCTION

De nos jours, on retrouve des réseaux de distribution d'eau un peu partout. Ces réseaux ont pour but d'assurer le transport de l'eau d'une source d'approvisionnement vers divers points d'utilisation: toilettes, cuisines, usines de transformation, appareils refroidis à l'eau, etc.

Les réseaux de distribution d'air comprimé jouent un rôle analogue. Ils servent à alimenter en air comprimé les outils, les systèmes de régulation et tout autre appareil dont le fonctionnement est à commande pneumatique.

Cependant, il arrive dans bien des cas que ces réseaux n'ont pas été conçus en prévision de travaux de rénovation, ou encore de mise en oeuvre d'un programme de maintenance régulière. C'est pourquoi ces réseaux offrent souvent des possibilités d'économies d'énergie appréciables lorsqu'on les examine d'un peu plus près.

Objectifs

Ce module a pour but de:

- décrire les réseaux de distribution d'eau et d'air comprimé utilisés dans les secteurs industriel, commercial et institutionnel;
- donner des exemples de diminution de la consommation d'énergie et des dépenses correspondantes;
- présenter des méthodes permettant de diminuer la consommation d'énergie et les dépenses correspondantes;
- fournir une série de feuilles de travail qui peuvent être utilisées pour évaluer les systèmes existants en comparaison avec les systèmes proposés en vue de déterminer les possibilités de diminution de la consommation d'énergie et des coûts correspondants.

Contenu

Ce module est divisé en trois sections:

- *Notions de base*. Cette section est réservée à la description des utilisations des réseaux de distribution d'eau et d'air comprimé.
- *Appareillage*. Cette section décrit les appareils de base employés dans les réseaux de distribution d'eau et d'air comprimé.
- *Possibilités de gestion de l'énergie*. Cette section traite des possibilités de diminution de la consommation d'énergie et des coûts correspondants (chiffres approximatifs à l'appui) et des façons de calculer les périodes de rentabilité.
- De plus, on retrouvera, en *Annexe*, un glossaire, des tables, des facteurs de conversion et des feuilles de travail.

NOTIONS DE BASE

Les réseaux de distribution d'eau et d'air comprimé utilisés dans les secteurs industriel, commercial et institutionnel ont pour but de fournir le volume d'eau ou d'air désiré, à la pression et à la température spécifiées, à l'endroit voulu. Pour y parvenir, les réseaux de distribution sont dotés de conduites, de robinets et d'accessoires. On utilise une pompe pour faire circuler l'eau dans les conduites d'eau et un compresseur pour transporter l'air dans les conduites d'air. Pour plus d'informations sur les pompes et compresseurs, voir le Module 13, Ventilateurs et pompes et le Module 14, Compresseurs et turbines.

Un examen attentif et soigné des réseaux de distribution existants et envisagés peut se révéler très utile pour se protéger contre une mauvaise exploitation d'un réseau, ou encore contre une mauvaise utilisation de l'énergie. Un personnel de conception, d'exploitation et de maintenance sensibilisé à la question de la gestion de l'énergie peut contribuer à réaliser des économies substantielles dans les domaines suivants:

- détection et élimination des fuites,
- diminution des pertes de charge par frottement et des chutes de pression correspondantes,
- diminution des pertes de chaleur des réseaux de distribution d'eau chaude et des gains de chaleur aux réseaux de distribution d'eau refroidie,
- mise en oeuvre de nouvelles applications techniques.

Les réseaux de distribution d'eau et d'air comprimé sont traités séparément pour des raisons de simplicité.

Pour faciliter la distinction entre pression absolue et pression effective dans ce module, la convention suivante sera appliquée:

- *la pression absolue est exprimée en kPa (abs.);*.
- *la pression effective est exprimée en kPa (eff.).*.

Réseaux de distribution d'eau

Bien qu'il existe une gamme étendue de réseaux de distribution d'eau dans les secteurs industriel, commercial et institutionnel, on y retrouve presque toujours les mêmes possibilités de gestion de l'énergie. Parmi les principaux types de fluides transportés, mentionnons:

- *Eau potable*.
- *Eau pour procédés*.
- *Eau chaude*.
- *Eau de refroidissement*.
- *Eau refroidie*.
- *Eau de condenseur*.
- *Eaux usées (récupération)*.
- *Solution de glycol* (utilisée comme substitut de l'eau lorsqu'il y a possibilité de gel).

Ce module ne traite pas des réseaux d'aqueduc, des réseaux d'égout pluvial ou sanitaire, des réseaux d'incendie, ni des réseaux de distribution d'eau pour usages spéciaux qui peuvent être propres à une industrie ou à une usine en particulier, pas plus que des réseaux d'évacuation de condensats, ces derniers étant traités dans le Module 8, Systèmes à vapeur et à condensat.

Description des systèmes

Les principales utilisations pour les réseaux de distribution énumérées ci-dessus sont les suivantes:

- *Les réseaux de distribution d'eau potable* approvisionnent en eau divers points comme les toilettes, les cuisines, les fontaines, etc. Ces réseaux de distribution d'eau chaude ou froide sont généralement dotés de conduites et d'accessoires en cuivre, en polychlorure de vinyle (PVC) ou en polychlorure de vinyle chloré (CPVC). Dans ce genre de réseau, la pression excède rarement 350 kPa (eff.), tandis que la température varie entre 5 et 65°C.

- *Les réseaux de distribution d'eau pour procédés* alimentent les usines en divers types d'eau chaude ou d'eau froide; exemple: eau de dilution, eau ionisée, eau de lavage, etc. Les conduites de ces réseaux sont généralement en cuivre, en acier, en acier galvanisé ou en plastique comme en polychlorure de vinyle (PCV) ou en polychlorure de vinyle chloré (CPVC). Dans la plupart de ces réseaux, la pression n'excède pas 1 375 Kpa (eff.), alors que la température varie entre 5 et 95°C.
- *Les réseaux de distribution d'eau chaude* fournissent de l'eau chaude à basse, moyenne ou haute température aux fins de fabrication ou de chauffage. Les conduites sont généralement en acier au carbone, quoiqu'elles peuvent être d'un autre matériau. Voici un tableau récapitulatif des pressions et températures maximales généralement utilisées pour chacun de ces réseaux de distribution d'eau chaude.

Réseau	**Température maximum**	**Pression maximum**
Basse température	121°C	207 kPa (eff.)
Moyenne température	176°C	1 034 kPa (eff.)
Haute température	230°C	2 068 kPa (eff.)

- *Les réseaux de distribution d'eau de refroidissement* alimentent en eau de refroidissement différents appareils faisant partie de l'équipement du procédé. Les conduites sont normalement en acier au carbone, quoiqu'elles peuvent être d'un autre matériau. L'eau de refroidissement peut provenir directement d'un réseau d'aqueduc, puis être retournée à l'égout après utilisation. Il existe aussi des réseaux de distribution en circuit fermé (avec recyclage). Dans ces systèmes, la chaleur transmise à l'eau au cours du procédé de refroidissement est rejetée à l'atmosphère après avoir circulé dans des étangs de refroidissement par évaporation ou des tours de refroidissement. Pour ces réseaux, la température de l'eau varie entre 5 et 30°C, tandis que la pression excède rarement 865 kPa (eff.).
- *Les réseaux de distribution d'eau refroidie* sont exploités un peu comme les réseaux de distribution d'eau de refroidissement. En effet, la température de l'eau est abaissée à l'aide d'un refroidisseur comportant un dispositif de réfrigération mécanique. Les conduites sont normalement en acier au carbone quoiqu'elles peuvent être d'un autre matériau. Les températures se situent entre 5 et 13°C, tandis que la pression n'excède généralement pas 865 kPa (eff.).
- *Les réseaux de distribution d'eau pour condenseurs*, parfois utilisés avec des tours de refroidissement ou encore reliés au réseau d'aqueduc ou à un puits, transportent de l'eau dans le but d'enlever la chaleur des condenseurs refroidis par eau. Les conduites sont normalement en acier au carbone, quoiqu'elles peuvent être d'un autre matériau.
- *Les réseaux de récupération d'eaux usées* sont destinés à intercepter l'eau provenant des divers appareils de refroidissement ou de chauffage. L'eau recueillie peut être réutilisée ou évacuée. Le matériau des conduites varie selon l'utilisation.
- *Les solutions au glycol* sont couramment employées comme substitut de l'eau lorsqu'il y a possibilité de gel. On utilise le glycol pour des systèmes de fonte de neige, ou encore lorsque le réseau est utilisé pour alimenter des serpentins de chauffage à 100% d'air extérieur. On emploie également le glycol dans des parties ou zones bien spécifiques d'un système de chauffage ou de refroidissement lorsqu'on craint le gel de l'eau en raison du fonctionnement intermittent du réseau ou de l'importance de la longueur des conduites exposées à l'air extérieur. Cependant, il convient de noter que le glycol est très coûteux et qu'il favorise la corrosion à moins que l'on utilise des agents inhibiteurs de corrosion spécialement adaptés à l'application. Dans bien des cas, le glycol demeure la seule solution pratique.

Traitement de l'eau

L'eau peut renfermer bon nombre d'impuretés qui peuvent causer:

- la formation d'un dépôt de tartre sur les surfaces de transfert de la chaleur. Le tartre, qui agit comme matériau isolant, peut diminuer considérablement l'efficacité des appareils de chauffage ou de refroidissement;
- l'accumulation de tartre sur la paroi intérieure des conduites de même qu'à l'intérieur des appareils refroidis par eau, ce qui a pour effet de diminuer le diamètre intérieur des conduites ou encore celui des voies d'eau aménagées à l'intérieur de ces appareils. Le tartre, en diminuant le diamètre des conduites, ralentit l'écoulement de l'eau et peut même, dans certains cas extrêmes, parvenir à obstruer complètement le passage de l'eau;
- l'endommagement ou la destruction des conduites et des appareils en raison de la corrosion;

- un taux d'usure élevé des pièces mobiles; ex.: pompes, arbres, garnitures d'étanchéité, etc. L'usure est causée par un frottement accru dû aux impuretés de l'eau qui se glissent entre les pièces mobiles.

Il est difficile de remédier aux problèmes causés par les impuretés dans l'eau. C'est pourquoi il importe de consulter des spécialistes qui sont en mesure d'analyser l'alimentation en eau, d'examiner les utilisations et de faire des recommandations visant à diminuer ou éliminer ce genre de problèmes. Le traitement recommandé peut porter sur la filtration ou le traitement chimique de l'eau.

Filtration

Les filtres sont destinés à enlever mécaniquement les matières en suspension dans l'eau. Pour ce faire, deux types de filtre sont utilisés — le filtre à sable ou le filtre à tamis — selon la nature et la taille des matières en suspension. Comme ces filtres retiennent les matières en suspension, il importe de les nettoyer périodiquement.

Traitement chimique

Un spécialiste en traitement des eaux peut recommander le traitement chimique approprié pour réduire ou éliminer les problèmes causés par les impuretés de l'eau. Cependant, il convient de noter que les réseaux de distribution d'eau traités chimiquement ne peuvent pas être raccordés à des réseaux de distribution d'eau potable. Si ces deux types de réseau doivent être raccordés ensemble, il faut poser des dispositifs anti-refoulement.

Tuyauterie

La force requise pour déplacer un kilogramme de liquide, au débit voulu, du point d'aspiration au point de refoulement, constitue la charge totale du réseau. Règle générale, on utilise une pompe pour fournir cette force. Ainsi, la charge totale de la pompe doit être égale à la charge totale du réseau.

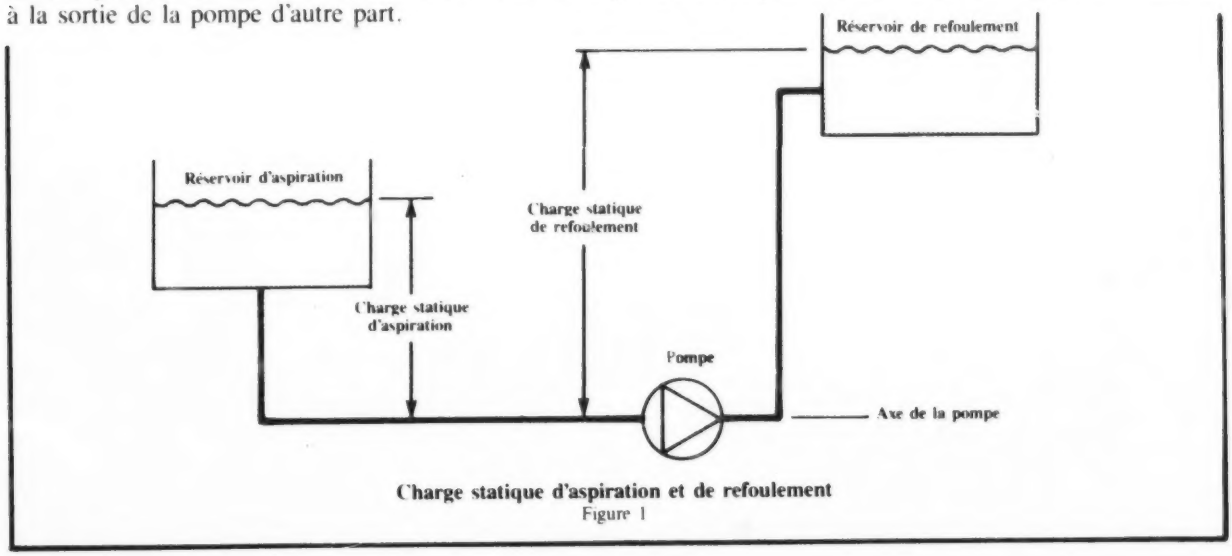
En réalité, la charge totale englobe deux notions: la charge à l'aspiration et la charge au refoulement. La charge nécessaire pour déplacer un liquide du réservoir d'aspiration à la pompe s'appelle la charge à l'aspiration et la charge nécessaire pour acheminer un liquide de la pompe au réservoir de refoulement, la charge au refoulement. Ces charges se subdivisent de nouveau en charge statique, en hauteur piézométrique et en perte de charge. Ce module traite globalement de cette question. Pour plus de détails à ce sujet, voir le Module 13, Ventilateurs et pompes.

Charge statique

Par charge statique du côté aspiration de la pompe, on entend la différence de hauteur, exprimée en mètres, entre le niveau du liquide dans le réservoir d'aspiration et l'axe de la pompe à l'aspiration (Figure 1). La charge statique d'aspiration est dite négative lorsque le réservoir d'aspiration se trouve au-dessous de l'axe de la pompe.

Par charge statique du côté refoulement de la pompe, on entend la hauteur du niveau du liquide le plus élevé au-dessus de la ligne centrale de la pompe. Lorsque cette hauteur se trouve au-dessous de l'axe de la pompe, la charge statique de refoulement est alors dite négative.

Un grand nombre de postes de pompage sont dotés de réservoirs d'aspiration ou de refoulement qui ne sont pas à la pression atmosphérique. De plus, la pression exercée à la surface d'un liquide contenu dans un réservoir agit sur la charge statique. C'est pourquoi la pression exercée à la surface d'un liquide, exprimée en hauteur d'eau, est dite pression de surface d'aspiration à l'entrée de la pompe d'une part et pression de surface de refoulement à la sortie de la pompe d'autre part.



Charge statique d'aspiration et de refoulement
Figure 1

Perte de charge

Par perte de charge, on entend l'énergie qu'il faut par kilogramme de fluide pompé pour surmonter les pertes de charge par frottement causé par l'écoulement du fluide dans des conduites. On retrouve des pertes de charge tant du côté aspiration que du côté refoulement.

Les pertes de charge sont fonction du matériau pompé, du débit, de la vitesse d'écoulement du fluide dans les conduites, du diamètre et de la longueur des conduites, du fini à l'intérieur de la paroi, des accessoires et de tout autre appareil ou dispositif raccordé au réseau. Dans divers manuels de tuyauterie, des tables permettent d'établir les pertes de charge pour différents accessoires, celles-ci étant exprimées en longueurs équivalentes de conduites. De même, il existe des tables et des graphiques pour convertir le débit, le diamètre et la longueur des conduites en pertes de charge par frottement (Table 1).

Charge totale

La charge totale à l'aspiration et *la charge totale au refoulement* peuvent être calculées à l'aide des équations suivantes:

Charge totale à l'aspiration = aspiration (charge statique + hauteur piézométrique + perte de charge)

Charge totale au refoulement = refoulement (charge statique + hauteur piézométrique + perte de charge)

Une fois les charges établies, il est facile de calculer la *charge totale du réseau* pour un débit particulier. Le débit agit sur les pertes de charge par frottement qui, à leur tour, modifient la charge totale du réseau.

Il convient de noter que tous les facteurs doivent être exprimés à l'aide de la même unité de mesure (hauteur d'eau). La charge totale du réseau peut être formulée de la manière suivante:

Charge totale = charge totale au refoulement — charge totale à l'aspiration.

La charge totale du réseau est une valeur utilisée pour choisir la pompe et le moteur qui conviennent le mieux aux besoins de l'application.

Écoulement de l'eau dans les conduites

Lorsque de l'eau s'écoule dans une conduite, il y a frottement causé par les particules du fluide frottant d'abord les unes contre les autres, puis le long de la paroi interne de la conduite. Le frottement est fonction de plusieurs facteurs: débit du fluide, diamètre et longueur de la conduite, fini de la paroi interne de même que type de robinets et accessoires utilisés. Le frottement entraîne une perte de charge dans le sens de l'écoulement du liquide. Des tables publiées à cet effet indiquent les pertes de charge par unité de longueur de conduite en acier au carbone, compte tenu du diamètre et du débit de la conduite. Ces tables indiquent également la vitesse d'écoulement du liquide dans la conduite (Table 1).

En tuyauterie, le calibre est une valeur définissant la résistance à la pression et à l'effort d'une conduite. L'acronyme NPS signifie le diamètre nominal de la conduite. Le nombre indiqué après l'acronyme NPS correspond au diamètre nominal de la conduite exprimé en pouces (ex.: NPS 2 signifie une conduite d'un diamètre nominal de 2 pouces). Pour plus de renseignements à ce sujet, consulter le manuel Piping Handbook, écrit par Crocker et King et publié chez McGraw Hill.

Les vitesse et pertes de charge par longueur de 100 mètres, pour de l'eau à 15°C s'écoulant à différents débits dans une conduite d'un diamètre nominal de 2 pouces et de calibre 40, sont données à la Table 2. Pour de l'eau s'écoulant à un débit de 1,66 L/s, la vitesse de l'eau est de 0,77 m/s, tandis que la perte de charge par 100 mètres est de 14,1 kPa (eff.).

D'après la Table 2, il est bien évident que plus le débit est élevé, plus la vitesse et la perte de charge sont importantes. En matière de tuyauterie, il existe une règle générale qui indique que la vitesse de l'eau ne doit jamais être inférieure à 1,5 m/s ni supérieure à 3 m/s. Dans le cas de courtes sections servant à raccorder une composante au réseau de distribution, des vitesses excédant 3 m/s sont tolérées. Cette règle vaut pour des conduites d'un diamètre nominal variant de 2 à 10 po. Pour éviter les dépôts lorsque l'eau renferme des matières solides en suspension, il importe de veiller à ce que la vitesse de l'eau soit supérieure à 2 m/s.

Toutes les fois que l'eau qui s'écoule dans une conduite droite rencontre un obstacle qui agit sur l'écoulement, il y a modification des caractéristiques du profil du débit. En effet, tout obstacle crée de la turbulence, ce qui a pour effet d'entraîner une perte de charge supérieure à celle prévue. Comme les accessoires et les robinets perturbent également le débit, ils ne font qu'ajouter à la perte de charge. Les fabricants ont donc préparé des tables et des graphiques pour illustrer les pertes de charge imputables aux robinets et accessoires exprimées en longueurs équivalentes de conduite (Table 3).

Les pertes de charge par frottement, tant du côté aspiration que du côté refoulement, peuvent être calculées lorsque la configuration du réseau de distribution, le diamètre des conduites et le débit d'eau sont connus.

Vous trouverez à la Feuille de travail 12-1 une feuille de calcul pour les pompes.

Perte de chaleur dans les conduites

Toute conduite transportant un fluide dont la température est supérieure à celle de l'air ambiant perdra de la chaleur. Plus la différence de température entre le fluide transporté et l'air ambiant est grande, plus la perte de chaleur est importante.

Effets de l'isolation

L'installation d'un isolant autour de conduites nues ou mal isolées transportant des fluides froids ou chauds permet de diminuer la consommation d'énergie et de réaliser des économies. Les Tables 4 et 5 montrent les pertes de chaleur respectives pour une conduite nue en acier et une conduite nue en cuivre terni. Pour une conduite nue en acier d'un diamètre nominal de 6 pouces transportant de l'eau chaude à 65°C, la Table 4 indique que la perte de chaleur est de 290 watts par mètre linéaire à l'heure.

Le Module 1, Isolation thermique des équipements, renferme des tables qui donnent les pertes de chaleur pour des conduites isolées, à différentes températures, de même que l'épaisseur de l'isolation recommandée selon le matériau isolant utilisé.

Revenons à l'exemple ci-dessus. Si la conduite avait été isolée avec un isolant en fibre de verre de 50 mm d'épais, la perte de chaleur par mètre linéaire aurait pu être abaissée à 20,19 W/(m·h) et la température à la surface du matériau isolant, à 21,5°C.

Longueur de la conduite 100 m

Durée d'exploitation du réseau 8 760 h/an

Diminution de la perte de chaleur = 290 W/(m·h) − 20,19 W/(m·h)

= 269,81 W/(m·h)

Perte de chaleur/année = 269,81 W/(m·h) × 100 m × 8 760 h/an

= 236 353 560 W/an

ou $\frac{236\ 353\ 560\ \text{W/an}}{1\ 000\ \text{W/kW}}$

= 236 354 kW/an

Basé sur un coût de l'électricité de 0,05$ le kWh:

Économies = 236 354 kW × 0,05$

= 11 818$

Autant que possible, les robinets, accessoires et brides doivent être isolés. Ces accessoires, s'ils ne sont pas isolés, ajoutent aux pertes de chaleur. De plus, en isolant les conduites, on élimine le risque de brûlures pour le personnel.

Réseaux de distribution d'air comprimé

De nombreux perfectionnements ont été apportés aux appareils et outils à commande pneumatique dans le but d'accroître la productivité dans les secteurs industriel, commercial et institutionnel. Aujourd'hui, ces outils et appareils sont nettement plus efficaces, quoique leur rendement peut être grandement diminué si le réseau de distribution d'air comprimé est en mauvais état.

Un réseau de distribution d'air comprimé mal entretenu peut être à l'origine de fuites; cela se traduit généralement par une plus grande consommation d'énergie (pour comprimer l'air à la pression désirée) et un rendement moindre des appareils puisque l'air n'est pas acheminé à la pression requise.

La puissance d'un réseau de distribution d'air comprimé est toujours exprimée en termes de *débit à l'air libre*, ce qui correspond au débit à la pression atmosphérique. Ainsi, il n'est pas toujours nécessaire d'indiquer la pression réelle pour chacune des applications. Lorsqu'on jette un coup d'oeil sur les factures d'électricité, on se rend bien compte que la compression de l'air est une opération coûteuse. Ce module renferme de nombreux exemples concrets à ce sujet.

Ce module traite des réseaux de distribution utilisés pour assurer le transport de l'air aux points d'utilisation. Quant à la compression de l'air, elle est abordée dans le Module 14, Compresseurs et turbines. Les réseaux de distribution d'air comprimé se divisent en deux grandes catégories:

- Réseaux pour le processus; dans ces réseaux, l'air comprimé est utilisé pour alimenter les appareils et outils opérés à l'air.
- Réseaux pour l'instrumentation; dans ces réseaux, l'air comprimé est utilisé pour alimenter les instruments et appareils de régulation à commande pneumatique.

Dans la plupart des installations, ces deux types de réseau de distribution d'air sont installés séparément parce que, dans le cas du réseau de distribution d'air pour l'instrumentation, la teneur en humidité et la propreté de l'air sont deux facteurs qui jouent un rôle beaucoup plus important que dans le cas du réseau de distribution d'air pour le processus.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la compression d'air est une opération coûteuse. C'est pourquoi la gestion des réseaux de distribution d'air comprimé a une grande influence sur les coûts. Parmi les points qu'il convient de surveiller pour assurer une meilleure gestion des besoins énergétiques d'un réseau de distribution d'air comprimé, mentionnons:

1. fuites,
2. exploitation du réseau à la pression la plus basse possible,
3. réduction au minimum de la perte de charge à l'intérieur du réseau, et
4. infiltration de l'eau dans le réseau.

Vous trouverez ci-après des exemples illustrant les avantages découlant d'une bonne gestion des réseaux de distribution d'air comprimé.

1. Il importe de détecter et de réparer les *fuites*. Les principales fuites d'air ont lieu au niveau des joints, des robinets, des accessoires et des raccords de boyaux. Lorsque le réseau fonctionne normalement, les fuites sont difficiles à déceler à cause du bruit de fond; mais comme elles représentent une source importante de dépenses inutiles, il importe de leur accorder une attention toute spéciale.

Vous trouverez à la Table 6 une façon de calculer les débits de fuites d'air. Cette Table fait voir qu'une fuite, si petite soit-elle, peut entraîner des dépenses énergétiques élevées. En fait, les fuites peuvent représenter jusqu'à 30 pour cent de la consommation d'air comprimé. Il s'agit là d'un point auquel il convient de s'attarder puisqu'une saine gestion de l'énergie dans ce domaine peut rapporter beaucoup moyennant de faibles investissements. Il importe donc d'utiliser les tables des divers fabricants portant sur les débits des fuites d'air, compte tenu du diamètre des orifices et de la pression d'air.

Un simple test suffit pour vérifier l'étanchéité d'un réseau de distribution d'air. Lorsque l'installation est arrêtée, mettez le compresseur en marche, puis laissez-le fonctionner jusqu'à ce qu'il s'arrête. Notez l'heure. S'il y a des fuites d'air dans le réseau, la pression va tomber, ce qui va entraîner de nouveau la mise en marche du compresseur. Encore une fois, notez l'heure. Répétez cette opération au moins quatre fois. Dans chaque cas, notez les heures auxquelles le compresseur se met en marche et s'arrête. Au terme du quatrième test, vous pourrez établir le temps moyen de compression et de décompression du réseau.

Formule de calcul:

$$\text{Fuite} = \frac{Q \times T}{T + t}$$

Fuite = fuite du système (L/s)

Q = débit d'air comprimé (L/s)

T = temps de compression (s)

t = temps de décompression (s)

Pour effectuer ce calcul, on utilise la feuille de travail 12-2. (Voir l'exemple plus loin)

2. Il est souhaitable de *faire fonctionner le système à la pression la plus basse possible*. Il arrive souvent que l'on maintienne l'air à une pression élevée, même après l'enlèvement des outils ou appareils qui nécessitaient une pression plus élevée. En pareil cas, on peut diminuer la pression. Par ailleurs, il arrive également qu'une piètre maintenance des outils et appareils (graissage inadéquat ou conduites de trop petit diamètre) engendre une demande à une pression plus élevée que la pression normale de fonctionnement.

3. La conception du réseau doit être telle qu'elle *favorise une réduction au maximum de la perte de charge à l'intérieur du réseau de distribution*. Il arrive souvent que l'on procède à des travaux d'agrandissement, à des ajouts d'appareils, ou encore à des relocalisations de machines sans apporter les modifications nécéssaires aux réseaux de distribution d'air comprimé. On ajoute de nouvelles canalisations, on effectue de nouveaux raccords et, parfois même, on augmente le débit d'air en raison d'une plus grande consommation d'air comprimé. Une augmentation du débit d'air dans les conduites et raccords se traduit toujours par un accroissement de la perte de charge. Cette perte de charge peut être importante, selon le débit d'air et le diamètre des conduites. Comme la pression d'air demandée aux points d'utilisation est toujours la même, une augmentation du débit d'air entraîne toujours une plus grande consommation d'énergie de la part du compresseur. La Table 7 fait voir différentes pertes de charge en fonction de différents diamètres de conduites et débits.

4. Il faut faire attention à ce que *l'eau ne s'infiltre pas dans le réseau de distribution d'air comprimé*. L'eau, ou encore un mélange d'eau et d'huile de graissage pour compresseur, favorise la corrosion sur la paroi intérieure des conduites de distribution. La corrosion augmente la friction à l'intérieur des conduites et, par le fait même, les pertes de charge à l'intérieur du réseau. Une pression d'air plus faible réduit donc l'efficacité des appareils ou dispositifs à commande pneumatique. La corrosion favorise également la formation de piqûres ou cavités dans les conduites, ce qui a pour effet de les affaiblir et de provoquer des fuites au niveau des joints, purgeurs et robinets. La solution consiste à installer un sécheur d'air sur le compresseur pour éliminer l'humidité introduite dans le réseau. Il s'agit là d'une mesure extrêmement importante, surtout dans le cas des réseaux de distribution d'air d'instrumentation, parce que le bon fonctionnement des instruments en dépend directement.

Calcul simplifié pour fuites d'air

Feuille de travail 12-2

Entreprise: COMPAGNIE ABC LTÉE Date : 31 JUILLET

Endroit: ANYTOWN Par : MBE

Numéro de compresseur : 2 - POUR PROCÉDÉS

Débit d'air libre du compresseur 236 L/s (Q)
(indiqué sur la plaque signalétique)

1 Faire fonctionner le compresseur jusqu'à ce qu'il s'arrête

2 Inscrire le temps écoulé avant sa remise en marche

3 Inscrire l'heure à laquelle le compresseur s'est arrêté de nouveau

4 Répéter 4 fois

Cycle	Temps — départ/arrêt (T Secondes)	Temps — arrêt/départ (t Secondes)
1	30	180
2	32	178
3	33	188
4	30	182
Total	125 s	728 s

Moyenne $T = \frac{\text{Total}}{4} = \frac{125}{4} = 31.25$ s $\quad t = \frac{\text{Total}}{4} = \frac{728}{4}$ s $= 182$ s

Fuite $= \frac{Q \times T}{T + t} = \frac{236 \times 31.25}{31.25 + 182}$

$= 34.58$ L/s

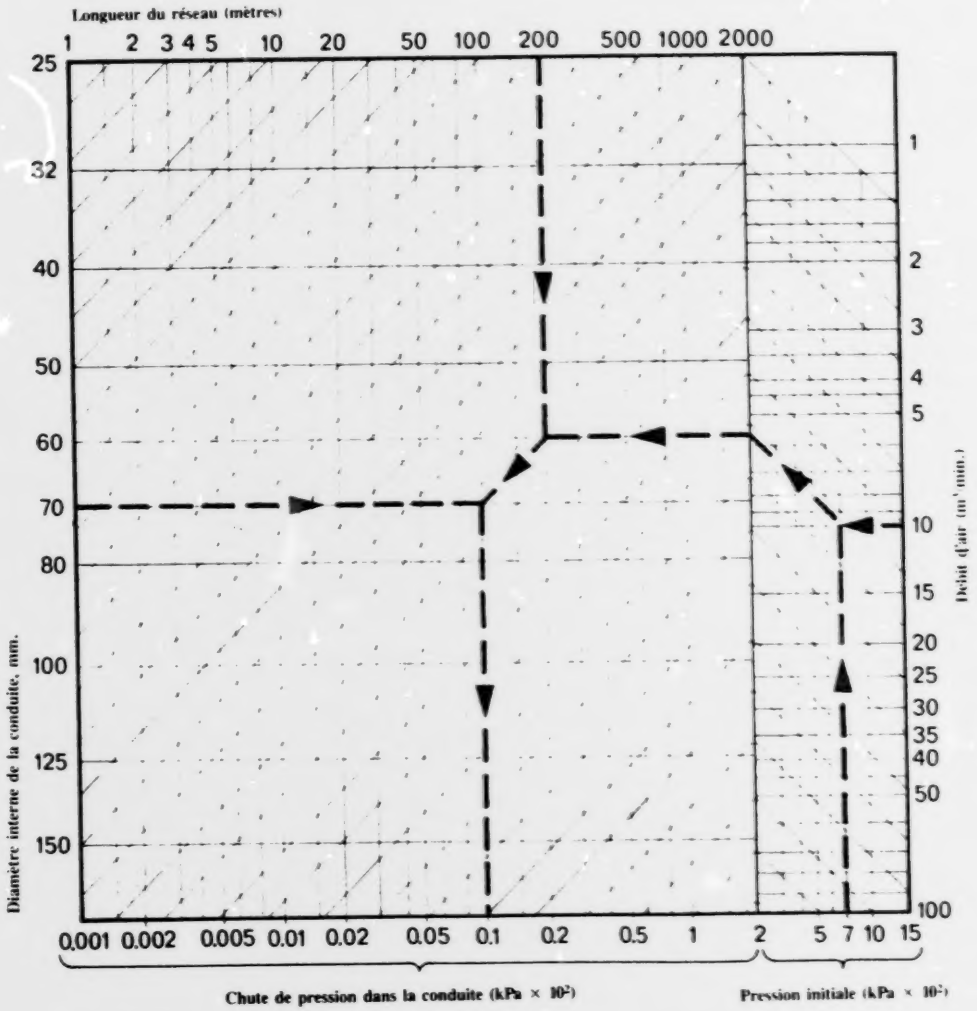
Pour plus de renseignements sur les compresseurs, voir le Module 14, Compresseurs et turbines.

Écoulement de l'air dans les conduites

On peut utiliser des abaques (Figure 2) pour calculer la perte de charge d'un réseau de distribution d'air. La longueur du réseau doit être augmentée de la longueur équivalente voulue pour tenir compte des pertes de charge causées par les différents accessoires et robinets compris dans le réseau.

La Figure 2 illustre l'exemple suivant:

Pression initiale du réseau	700 kPa (eff.)
Débit d'air	10 m^3/mn (166.66 L/s)
Longueur totale des conduites	200 m
Diamètre des conduites	70 mm
Perte de charge dans les conduites (d'après le nomogramme)	10 kPa



Abaque des chutes de pression d'un réseau de distribution d'air
Figure 2

Analyse énergétique

Les réseaux de distribution d'air comprimé et d'eau que l'on retrouve dans les secteurs industriel, commercial et institutionnel offrent d'excellentes possibilités de gestion énergétique. En effet, il suffit souvent d'une simple analyse au passage des installations pour en déceler un grand nombre. Des analyses de ce genre donnent généralement de meilleurs résultats si elles sont effectuées par des personnes sensibilisées aux questions de gestion de l'énergie et capables de jeter un regard neuf. Parmi les premiers points à surveiller lors d'une analyse au passage d'une installation sont les suivants: boyaux ou robinets laissés ouverts, accessoires fuyants, enveloppe isolante des conduites d'eau chaude ou froide endommagée, cuvettes de filtre à air de type à vidange manuelle remplies d'eau ou d'autres matériaux, et graisseurs automatiques vides. Un personnel de gestion et d'exploitation vigilant de même qu'un programme efficace de maintenance peuvent contribuer à diminuer les pertes d'énergie, à favoriser un meilleur rendement énergétique et à réaliser des économies substantielles.

Tous les points relevés lors d'une inspection au passage ne sont pas toujours aussi faciles à analyser que ceux décrits précédemment. Ainsi, on peut remarquer qu'une conduite d'alimentation en eau refroidie n'est pas isolée et absorbe de la chaleur de l'air ambiant. Comme première réaction, on serait sans doute porté à vouloir isoler cette conduite dans le but de diminuer le gain thermique. Cependant, en pareil cas, il vaut mieux d'abord se poser les questions qui suivent avant d'adopter toute mesure correctrice.

- Quelle épaisseur d'isolation?
- Quel type de matériau isolant?
- Est-ce que la diminution de la consommation d'énergie et les économies qui en résulteront justifient les coûts d'isolation?

Il est nécessaire de procéder à une analyse de diagnostic pour déterminer mathématiquement les gains réels d'énergie et la diminution possible de la consommation d'énergie. C'est en diminuant la consommation de l'énergie qu'on parvient à réaliser des économies. Alors, si on tient compte des économies possibles de même que des coûts estimés d'achat et d'installation de l'isolation, il est facile de calculer la période de rentabilité et par conséquent de juger de la rentabilité du projet.

Les possibilités de gestion d'énergie se divisent en trois principales catégories.

- *Possibilités de maintenance*. On entend ici toute initiative de gestion de l'énergie qui est *exécutée à intervalles réguliers et jamais moins d'une fois par année*. Exemple: réparation de fuites, programmes de maintenance préventive et programmes de réparation des isolants.
- *Possibilités d'amélioration de coût modique*. Par possibilité d'amélioration de coût modique, on entend toute initiative de gestion de l'énergie qui est *exécutée une seule fois et pour laquelle le coût n'est pas élevé*. Exemple: installation de régulateurs de débit de même que de graisseurs et de filtres à air.
- *Possibilités de rénovation*. Par possibilité de rénovation, on entend toute initiative de gestion de l'énergie qui est *exécutée une seule fois et pour laquelle le coût est élevé*. Exemple: pose d'une enveloppe isolante autour des conduites d'eau chaude ou refroidie, installation de sécheurs d'air sur des compresseurs d'air ou remplacement de la tuyauterie au complet.

Il convient de noter que la différence de prix entre les possibilités d'amélioration de coût modique et les possibilités de rénovation est normalement fonction de la taille, du type et de la politique financière de l'entreprise en question.

Sommaire

Les réseaux de distribution d'eau et d'air comprimé offrent de nombreuses possibilités d'économie d'énergie et de diminution des coûts. Lorsque le personnel de direction et d'exploitation est en mesure de déceler ces possibilités et réagir à temps, il peut contribuer à la réalisation d'économies substantielles. Un personnel vigilant et sensibilisé aux techniques de gestion d'énergie peut reconnaître facilement ces possibilités.

L'exploitation d'un réseau de distribution d'air comprimé exige la réparation de toutes les fuites, principale source de gaspillage, pour diminuer la consommation d'énergie et réaliser des économies substantielles. Parmi les autres questions qu'il convient de se poser, mentionnons:

- Les boyaux et accessoires sont-ils en bon état? Peuvent-ils être remplacés par des conduites rigides?
- Les filtres à air conviennent-ils à l'application et sont-ils bien entretenus?
- Les graisseurs automatiques fonctionnent-ils correctement? Sont-ils vérifiés et remplis régulièrement?
- Le système fonctionne-t-il à la pression voulue? Y a-t-il possibilité de diminuer la pression?
- Le compresseur d'air convient-il à l'application?

Les reseaux de distribution d'eau offrent egalement de nombreuses possibilites de diminution de la consommation d'energie et de realisation d'economies considerables. Parmi les points qui offrent les possibilités les plus interesssantes, mentionnons

- La temperature de l'eau convient-elle à l'application? Y a-t-il possibilite d'abaisser la temperature de l'eau?
- Les reseaux de distribution d'eau chaude et d'eau froide sont-ils isoles convenablement?
- La pression peut-elle être diminuee?
- Y a-t-il possibilite de transformer le système sans recyclage en un système avec recyclage?
- Peut-on récupérer et utiliser l'énergie thermique des eaux usées?
- Le traitement de l'eau est-il utilisé pour éliminer les impuretés de l'eau?

La question de gestion de l'énergie doit être abordée avec un esprit ouvert, c'est-à-dire qu'il faut être capable d'accepter de traiter des méthodes adoptées antérieurement, mais qui ont donné des résultats insatisfaisants. Les possibilités mentionnées dans la section Possibilités de gestion d'énergie de ce module peuvent donner naissance à d'autres idées nouvelles, analogues ou encore mieux adaptées aux besoins particuliers d'une usine. La sensibilisation des membres de la direction, des employés d'exploitation et des préposés à la maintenance à la gestion de l'énergie et la mise en œuvre d'un programme de gestion d'énergie dynamique et efficace peuvent sûrement favoriser une diminution de la consommation d'énergie et une augmentation des économies réalisées.

APPAREILLAGE

Réseaux de distribution d'eau

Voici une description des principaux éléments d'un réseau de distribution d'eau.

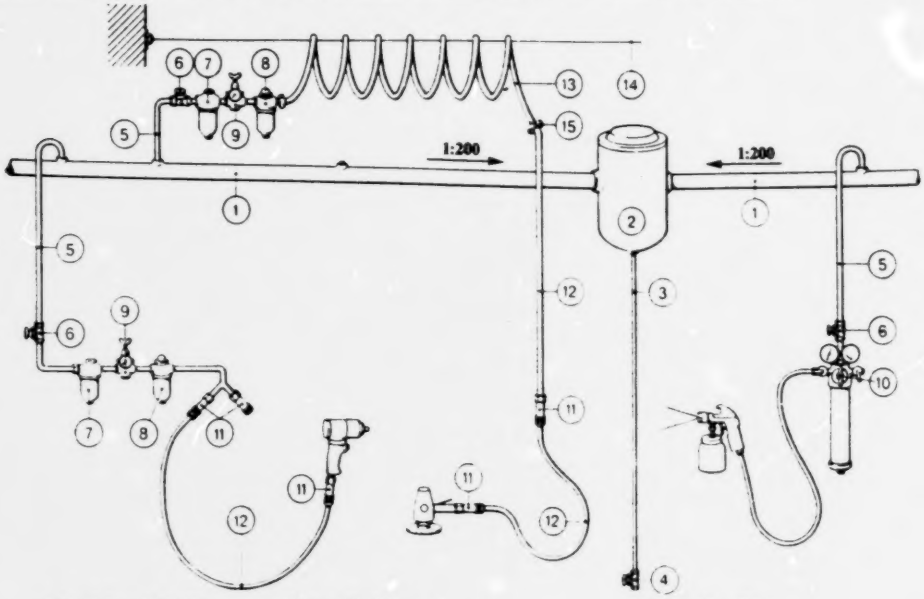
- Pompe(s): pour la circulation de l'eau dans un réseau de distribution.
- La tuyauterie incluant conduites, robinets et accessoires pour le transport de l'eau.
- Les réservoirs de dilatation utilisés dans des réseaux de distribution d'eau chaude pour tenir compte de la dilatation de l'eau.
- Les instruments et appareils de régulation tels manomètres, thermomètres, débitmètres et soupapes de réduction de pression.

On distingue deux principaux types de réseaux de distribution d'eau: les réseaux sans recyclage et les réseaux avec recyclage. Dans un réseau de distribution d'eau sans recyclage, l'eau est utilisée une seule fois, puis évacuée (exemple: eau de douche). Dans un réseau de distribution d'eau avec recyclage, l'eau est réutilisée. Exemple: réseau à recirculation d'eau chaude. Dans un pareil réseau, l'eau est d'abord chauffée, puis pompée jusqu'au point d'utilisation et, enfin, retournée pour être chauffée de nouveau.

Réseaux de distribution d'air comprimé

Vous trouverez ci-après une description des composants d'un réseau de distribution d'air comprimé.

- La tuyauterie incluant conduites, robinets et accessoires pour le transport de l'air comprimé depuis le réservoir d'air jusqu'à l'outil ou à l'appareil à commande pneumatique (Figure 3).



1 Conduite principale
2 Sécheur d'air
3 Conduite de drainage
4 Robinet de drainage
5 Conduite de branchement
6 Vanne d'isolation
7 Filtre à air
8 Lubrificateur à brûme
9 Régulateur à pression
10 Régulateur à pression avec filtre d'air
11 Raccord rapide
12 Boyau à air
13 Boyau en spirale
14 Câble enduit de plastique
15 Raccord à griffe

Représentation de conduites d'air et d'outils à commande pneumatique

Figure 3

- Un sécheur d'air, qui par l'entremise d'un système de refrigération ou d'un serpentin refroidi à l'eau, abaisse le point de rosée de l'air comprimé de façon à prévenir toute condensation de la vapeur d'eau à l'intérieur des conduites. Ce sécheur enlève également toute trace d'huile provenant du compresseur qui aurait pu être transportée dans les conduites d'air comprimé.
- Un réservoir d'air normalement situé entre le sécheur et le réseau de distribution pour emmagasiner l'air comprimé afin de répondre aux variations momentanées de la demande et diminuer le travail du compresseur. Le volume du réservoir d'air doit se situer entre 10 et 15 pour cent de la puissance du compresseur (exemple: si le compresseur a une puissance de 400 L/s, le volume du réservoir d'air devra être d'environ 60 L). Si le réseau de distribution comprend un appareil qui, soudainement, peut solliciter une quantité accrue d'air comprimé pendant une brève période, il convient alors d'ajouter un réservoir d'air supplémentaire près de cet appareil pour ne pas surcharger le compresseur et augmenter inutilement la consommation d'énergie. Une autre méthode consisterait à surdimensionner les principaux distributeurs pour augmenter le volume d'air contenu dans les conduits et les utiliser comme réservoir d'air supplémentaire.

Composants des réseaux

Les réseaux de distribution d'air comprimé comportent généralement des conduites en acier au carbone ou en acier galvanisé, de même que des accessoires comme des coudes, raccords en T, réducteurs et robinets. Parmi les autres composantes normalement comprises dans un réseau de distribution d'air comprimé, mentionnons:

- boyaux et raccords flexibles : une des principales sources de fuites d'air;
- accessoires en cuivre ou en laiton: cause de fuites possible en raison du filetage faussé ;
- filtres à air: installés en amont d'appareils comme les instruments pour assurer la filtration de l'air. Le degré de filtrage doit être fonction de l'application. En effet, plus la maille du filtre est fine ou petite, plus celui-ci retiendra d'impuretés, ajoutant par le fait même aux pertes de charge et aux possibilités de blocage des conduites;
- graisseurs automatiques: installés en amont d'appareils comme les vérins pneumatiques pour assurer le graissage. Le graissage est mesuré et réglé en fonction de chaque application;
- régulateurs d'air: utilisés pour diminuer la pression à l'intérieur du réseau de façon à répondre aux besoins spécifiques d'un appareil ou d'un dispositif.

POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE

Les «Possibilités de gestion de l'énergie», désignent les cas où l'utilisation rationnelle de l'énergie peut avoir comme résultat de réduire les coûts d'exploitation. Les trois principales catégories de possibilités de gestion de l'énergie — possibilités de maintenance, possibilités d'amélioration de coût modique et possibilités de rénovation — sont présentées dans cette section et expliquées à l'aide d'exemples concrets ou de textes décrivant les différentes façons de diminuer la consommation d'énergie et de réaliser des économies. Les possibilités décrites ne constituent pas un ensemble complet mais plutôt un aperçu destiné à permettre au personnel de direction, d'exploitation et de maintenance de se familiariser avec les différentes façons d'économiser l'énergie et à les aider à en déceler d'autres selon leur utilisation. Il pourrait sans doute se révéler avantageux de consulter les divers modules de cette série pour découvrir d'autres possibilités de gestion de l'énergie.

Possibilités de maintenance

Par possibilités de maintenance, on entend les initiatives de gestion de l'énergie qui sont prises de façon périodique et au moins une fois par année. Parmi celles-ci, mentionnons:

1. réparation de toutes les fuites;
2. contrôle étroit des réseaux de distribution d'air et d'eau, et notamment des pertes;
3. revue de tous les réseaux de distribution d'eau chaude et des possibilités d'abaissement de la température de l'eau au niveau minimum requis;
4. arrêt des systèmes ou des appareils en périodes d'inutilisation;
5. contrôle adéquat du traitement de l'eau pour s'assurer que les débits prévus sont respectés;
6. revue du programme de maintenance des filtres pour s'assurer que les filtres obturés partiellement ou complètement n'ajoutent pas aux pertes de charge du réseau;
7. maintenance adéquate du matériel de contrôle et de régulation;
8. éliminer autant que possible les boyaux et raccordements pour diminuer les possibilités de fuites;
9. vérification du bon fonctionnement des graisseurs pour diminuer le frottement dans les appareils à commande pneumatique.

Exemples concrets de maintenance

1. Réparation de fuites

Lors d'une analyse au passage d'une installation, on avait remarqué qu'un réseau de distribution d'air, sous pression de 600 kPa (eff.), fuyait à quatre endroits. Le diamètre moyen des fuites était d'environ 3 mm. Le réseau fonctionnait 8 760 heures par année.

La Table 6 indique qu'une fuite d'air sous pression de 600 kPa (eff.) par un orifice de 3 mm correspond à 10 L/s.

$$\text{Perte annuelle d'air} = \frac{n \times Q \times 3\,600 \times h}{1\,000}$$

Où, n = nombre de fuites

Q = volume de la fuite (L/s)

3 600 = secondes par heure (s/h)

h = heures par année (h/an)

1 000 = litres par mètre cube (L/m^3)

$$\text{Perte annuelle d'air} = \frac{n \times Q \times 3\,600 \times h}{1\,000}$$

$$\text{Perte annuelle d'air} = \frac{4 \times 10 \text{ L/s} \times 3\,600 \text{ s/h} \times 8\,760 \text{ h/an}}{1\,000 \text{ L/m}^3}$$

$$= 1\,261\,440 \text{ m}^3\text{/an}$$

En utilisant la même table, on s'aperçoit que chaque fuite représente une perte de 111$ par mois.

Économies annuelles après réparation des fuites = 4 × 111$/mois × 12 mois/an

= 5 328$

Les coûts estimés de main-d'oeuvre et de matériaux pour assurer la réparation de ces fuites sont de 275$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{275\$}{5\,328\$}$$

= 0,052 année (19 jours)

De plus, en diminuant le nombre de fuites, l'air comprimé supplémentaire peut permettre de répondre à d'autres besoins et de reporter ou supprimer l'achat d'un compresseur additionnel.

2. Contrôle des débits d'eau et d'air

Lors d'une tournée d'inspection d'une installation, on avait remarqué que deux boyaux d'eau de lavage de 12 mm avaient été laissés ouverts. La conduite d'alimentation en eau de ces deux boyaux était sous une pression de 210 kPa (eff.), tandis que l'eau provenait du réseau d'approvisionnement municipal.

La Table 1 indique que le débit par boyau est d'environ 1,89 L/s. En arrêtant l'alimentation en eau de ces boyaux, on peut réaliser les économies suivantes:

Économies d'eau = 2 × 1,89

= 3,78 L/s

Si on laisse l'eau s'écouler par les deux boyaux 384 heures par année, la quantité totale d'eau perdue est la suivante:

Eau perdue = 3,78 L/s × 3 600 s/h × 384 h/an

= 5 225 472 L/an

Comme l'installation n'utilise aucune pompe pour alimenter ces deux boyaux, on peut être porté à croire que cet exemple ne constitue pas une possibilité de gestion de l'énergie. Cependant, on peut affirmer que les coûts de pompage et de traitement de l'eau du réseau d'approvisionnement urbain seraient diminués; de même, les taxes d'eau imposées par la municipalité à la compagnie seraient réduites. Au prix de 0,41$/m^3, les économies réalisées seraient les suivantes:

$$\text{Économies} = \frac{5\,225\,472 \text{ L/an} \times 0{,}41\$/\text{m}^3}{1\,000 \text{ L/m}^3}$$

= 2 142$ par année

3. Abaissement de la température de l'eau chaude

En revoyant les utilisations du réseau de distribution d'eau chaude, on s'était rendu compte qu'un échangeur de chaleur alimenté en vapeur, utilisé pour assurer l'approvisionnement en eau nécessaire au rinçage d'un produit, avait été réglé pour maintenir la température de l'eau à 60°C. Cette eau n'était pas recyclée parce qu'elle était contaminée au cours du rinçage. La température de l'eau d'entrée de l'échangeur de chaleur était de 20°C.

Après avoir effectué certaines vérifications, on avait remarqué que la température de l'eau pouvait être abaissée à 48°C sans que cela ait des répercussions défavorables sur le rinçage. Le débit de l'eau était de 1 L/s, 800 heures par année. La pression de vapeur d'alimentation de l'échangeur de chaleur était de 270 kPa (abs.), tandis que l'efficacité du transfert de chaleur était de 85 pour cent.

On ne peut effectuer ce calcul si on ne consulte pas des tables de vapeur pour connaître la capacité calorifique de l'eau et de la vapeur. Le terme utilisé pour désigner la capacité calorifique de la vapeur est l'*enthalpie*. Cette valeur s'exprime en kJ/kg. La Table 8 donne des extraits de tables de vapeur. La table de vapeur doit être consultée en fonction de la valeur d'enthalpie désirée. Pour l'eau, il faut se reporter à la colonne donnée sous h_f. Pour la vapeur, il faut consulter la colonne apparaissant sous h_g. L'enthalpie doit être choisie directement en fonction de la température et de la pression appropriées.

Énergie nécessaire pour chauffer l'eau à 60°C

Enthalpie de l'eau à 60°C, 251,09 kJ/kg

Enthalpie de l'eau à 20°C, 83,86 kJ/kg

Consommation annuelle d'eau = 1 L/s × 3 600 s/h × 800 h/an

= 2 880 000 L/an

Supposons maintenant que 1 L = 1 kg

Quantité annuelle d'énergie calorifique requise = utilisation de l'eau × différence enthalpique

= 2 880 000 kg/an × (251,09 − 83,86) kJ/kg

= 481 622 400 kJ/an

Énergie nécessaire pour chauffer l'eau à 48°C

Enthalpie de l'eau à 48°C, 200,89 kJ/kg

Enthalpie de l'eau à 20°C, 83,86 kJ/kg

Consommation annuelle d'eau, 2 880 000 L/an

Quantité annuelle d'énergie calorifique requise = utilisation de l'eau × différence enthalphique

= 2 880 000 kg/an × (200,89 − 83,86) kJ/kg

= 337 046 400 kJ/an

Économie d'énergie = 481 622 400 − 337 046 400

= 144 576 000 kJ/an

Enthalpie de la vapeur à 270 kPa (abs.), 2 719,85 kJ/kg

Enthalpie de condensat à 270 kPa (abs.), 546,15 kJ/kg

Énergie disponible par kg de vapeur = enthalpie de la vapeur — enthalpie des condensats

= 2 719,85 − 546,15

= 2 173,7 kJ

Calculée en fonction d'une efficacité d'échangeur de chaleur estimée à 85 %, cette valeur équivaut à 2 173,7 × .85 = 1 847,645 kJ/kg

$$\text{Économie de vapeur} = \frac{144\,576\,000 \text{ kJ/an}}{1\,847{,}645 \text{ kJ/kg}}$$

$$= 78\,249 \text{ kg/an}$$

Calculées en fonction d'un coût de vapeur de 22$/1 000 kg, les économies d'énergie sont les suivantes :

$$\text{Économies d'énergie} = 78\,249 \text{ kg/an} \times 22\$/1\,000 \text{ kg}$$

$$= 1\,721\$ \text{ par année}$$

Autre avantage: on peut utiliser 78 249 kg de vapeur sous pression de 270 kPa (abs.) à d'autres fins, ce qui pourrait retarder un projet d'achat d'une nouvelle chaudière.

4. Arrêt des appareils

Lors d'une inspection systématique d'une installation, on avait remarqué que 7 mélangeurs de liquides à commande pneumatique fonctionnaient même lorsqu'ils étaient vides. Selon la plaque signalétique des mélangeurs, chaque appareil consommait 4 litres d'air à la seconde. De plus, la pression d'air de l'usine était de 600 kPa (eff.).

En prenant une période de référence de deux semaines, on a établi qu'il y avait, en moyenne, 6 mélangeurs qui fonctionnaient à vide en tout temps, y compris les week-ends et les périodes d'arrêt de l'usine.

La consommation inutile d'air comprimé se calculait de la manière suivante :

$$\text{Air} = 6 \times 4 \text{ L/s} \times 3\,600 \text{ s/h} \times 8\,760 \text{ h/an}$$

$$= 756\,864\,400 \text{ L/an}$$

En consultant la Table 6, on s'aperçoit qu'une fuite d'air d'un débit de 26,7 L/s coûte 298$ par mois. Les appareils à commande pneumatique doivent être arrêtés en périodes de non-utilisation.

$$\text{Économies} = 298\$ \times 12$$

$$= 3\,576\$ \text{ par année}$$

L'arrêt des mélangeurs pneumatiques ne coûtait rien parce qu'il y avait toujours des employés à proximité.

$$\text{Diminution de la consommation d'air} = \frac{756\,864\,400 \text{ L/an}}{1\,000 \text{ L/m}^3}$$

$$= 756\,864 \text{ m}^3\text{/an}$$

5. Contrôle du traitement de l'eau

Les rapports du directeur de la production indiquaient que le réseau de distribution d'eau de refroidissement ne parvenait pas à assurer adéquatement le refroidissement des produits et que la durée du bain de refroidissement des produits devait être prolongée. Pour remédier à la situation, on avait ouvert progressivement les robinets de l'eau de refroidissement jusqu'à leur limite maximum, mais cette solution ne donnait plus de résultats satisfaisants. La température d'arrivée du produit n'avait pas changé au cours des trois dernières années.

Des enquêtes subséquentes révélèrent que l'entartrage avait fait passer le diamètre original des conduites de 25 mm à 12 mm. La pression d'eau dans le distributeur était de 70 kPa (eff.), tandis que la longueur de la conduite raccordée à l'équipement de refroidissement était de 10 mètres. En consultant la Table 1, on s'aperçoit que cette section de 25 mm de diamètre doit pouvoir fournir 2,08 L/s d'eau avec une perte de charge de 70 kPa (eff.). Cependant, avec un diamètre de conduite réduit à 12 mm, le débit de l'eau de refroidissement n'était plus que de 0,58 L/s, soit le quart environ de la quantité prévue à l'origine. Cette quantité se révélait nettement insuffisante pour

satisfaire aux exigences du refroidissement. Comme première mesure, on pourrait être porté à remplacer cette conduite de 25 mm. Cependant, cette solution ne serait que de très courte durée. En effet, si le problème de la section d'embranchement est l'entartrage, il y a fort à parier que tout le réseau se trouve dans le même état. On devrait plutôt retenir les services d'un spécialiste en traitement des eaux et lui demander d'analyser le réseau de distribution en vue de prescrire le traitement voulu pour enlever les sels dissous dans l'eau d'arrivée.

Une solution à court terme, quoique non recommandée, consisterait à augmenter la pression de refoulement de la pompe en l'équipant d'un moteur de plus grande puissance et d'un impulseur de plus grande dimension. Cette solution comporte cependant certains risques puisque la pression limite des conduites peut être dépassée. De plus, en augmentant la pression à la pompe, la consommation d'énergie augmente.

6. Programme de maintenance des filtres

Des discussions avec le surintendant de la production avaient révélé que les appareils et autres outils à commande pneumatique ne fonctionnaient pas correctement. Le surintendant de la production était sur le point de demander à l'ingénieur des installations de faire passer la pression du réseau de distribution d'air de l'usine de 689 kPa (eff.) à 760 kPa (eff.) dans le but de remédier à la situation. D'autres entretiens avec l'ingénieur des installations avaient permis de découvrir qu'il n'y avait aucun programme de maintenance préventive pour les filtres des conduites d'air.

Un manomètre installé en aval d'un filtre de conduite d'air avait révélé que la pression, au lieu d'être de 689 kPa (eff.), n'était que de 550 kPa (eff.). Comme les outils avaient été conçus pour fonctionner à des pressions d'air se situant entre 620 et 689 kPa (eff.), la pression était insuffisante. En remplaçant les filtres, la pression d'air avait augmenté à 665 kPa (eff.), ce qui était amplement suffisant pour assurer le bon fonctionnement des outils à commande pneumatique. Le remplacement des filtres des autres dispositifs à commande pneumatique ont donné des résultats similaires. Suite à cette expérience, la direction décida de mettre sur pied un programme de maintenance préventive des filtres.

Dans ce cas-ci, il n'y a pas d'économies directes d'énergie. Cependant, s'il avait fallu augmenter la pression de l'air, cela se serait traduit par une consommation supplémentaire d'énergie.

7. Calibrage des appareils de contrôle et de régulation

Trop souvent, les appareils de contrôle et de régulation font l'objet d'entretien seulement lorsqu'un problème survient. Prenons, par exemple, le cas d'un débitmètre mesurant le débit de l'eau de refroidissement d'une installation. Si le débitmètre se dérègle et qu'il indique un débit inférieur au débit réel, l'opérateur, croyant bien agir, va probablement augmenter le débit d'eau de refroidissement pour remédier à la situation et, par le fait même, le porter au-delà de la valeur prévue. Les pompes consommeront alors une plus grande quantité d'énergie pour répondre aux besoins d'alimentation supplémentaires en eau de refroidissement.

Supposons maintenant que le débit de l'eau de refroidissement est de 5 L/s, à une pression de 117,4 kPa (eff.). La Table 9 indique que la puissance théorique nécessaire pour pomper l'eau est établie à 0,588 kW.

Si on fait passer le débit à 7,5 L/s et que la pression demeure la même, la puissance théorique nécessaire pour pomper l'eau devient alors 0,882 kW. La puissance de pompage supplémentaire peut alors être formulée de la manière suivante: 0,882 — 0,588 = 0,294 kW. Si les pompes fonctionnent 6 000 heures par année et que le coût de l'électricité est de 0,05$ du kWh, les coûts supplémentaires sont les suivants:

$$\text{Coûts supplémentaires} = 0{,}294\ \text{kW} \times 6\,000\ \text{h/an} \times 0{,}05\$/\text{kWh}$$

$$= 88{,}20\$\ \text{par année}$$

Ces coûts ne tiennent pas compte de l'eau supplémentaire qu'il faut peut-être acheter:

$$\text{Eau achetée} = 2{,}5\ \text{L/s} \times 3\,600\ \text{s/h} \times 6\,000\ \text{h/an}$$

$$= 54\,000\,000\ \text{L/an}$$

Calculé au prix de 0,41$ le mètre cube d'eau, le coût de l'eau supplémentaire devient alors le suivant:

$$\text{Coût supplémentaire} = \frac{54\,000\,000\ \text{L/an} \times 0{,}41\$/\text{m}^3}{1\,000\ \text{L/m}^3}$$

$$= 22\,140\$\ \text{par année}$$

8. Boyaux et raccords

En analysant un immeuble à vocation institutionnelle, on avait constaté que des appareils pneumatiques étaient raccordés par des boyaux flexibles et des raccordements rapides pour boyaux flexibles. Cette analyse avait permis de constater qu'un grand nombre de ces raccords (principales sources de fuites d'air) fuyaient. Par la suite, on estima que la somme des fuites correspondait à un orifice de 5 mm de diamètre. La pression d'air était de 600 kPa (eff.).

La Table 6 montre qu'en pareilles conditions, les pertes mensuelles totales du réseau de distribution d'air, pour débit de 26,7 L/s, s'élèvent à 298$. Le coût annuel est donc de 3576$.

Comme il n'y avait qu'une seule extrémité des boyaux qui nécessitait un raccordement rapide, la moitié (50%) de ces raccords fut remplacée par une tuyauterie étanche. La diminution de la consommation annuelle d'air comprimé, de l'ordre de 435 197 m^3, entraîna des économies de 1 788$ par année.

Les coûts estimés de remplacement, y compris les coûts de main-d'oeuvre et de matériaux, sont de 1 000$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{1\,000\$}{1\,788\$}$$

$$= 0{,}56 \text{ année (7 mois)}$$

9. Fonctionnement et maintenance des graisseurs automatiques

Au cours d'une visite d'une installation, le directeur avait remarqué que certaines cuvettes de graisseurs automatiques du réseau de distribution d'air principal étaient vides. Un examen plus attentif lui avait révélé que les garnitures des tiges des vérins pneumatiques alimentés par ces graisseurs étaient sèches et qu'elles fuyaient. Sur les quarante vérins pneumatiques vérifiés, sept fuyaient par la garniture de tige. Le réseau de distribution d'air de l'usine exerçait une pression de 600 kPa (eff.) sur l'extrémité de la tige de chaque vérin pendant 30 secondes par minute. Après analyse, on estima que chaque fuite correspondait à un orifice de 1 mm et que les vérins fonctionnaient 160 heures par mois. Les garnitures de tiges qui fuyaient furent remplacées et un programme de maintenance préventif fut mis sur pied pour s'assurer que les graisseurs automatiques soient remplis et réglés à intervalles réguliers.

La Table 6 indique qu'un orifice d'un diamètre de 1 mm à une pression de 600 kPa (eff.) entraîne une fuite d'un débit de 1 L/s et que le coût de cette fuite s'élève à 10,74$/mois.

$$\text{Fuite d'un volume de 1 L/s} = 1 \text{ L/s} \times 3\,600 \text{ s/h} \times 24 \text{ h/jour} \times 30 \text{ jours/mois}$$

$$= 2\,592\,000 \text{ L/mois}$$

$$\text{Diminution mensuelle possible de la consommation d'air} = 7 \text{ vérins} \times 1 \text{ L/s} \times 30 \text{ s/min} \times 60 \text{ min/h} \times 160 \text{ h/mois}$$

$$= 2\,016\,000 \text{ L/mois}$$

$$\text{Économies annuelles possibles} = \frac{2\,016\,000 \times 10{,}74\$ \times 12}{2\,592\,000}$$

$$= 100{,}24\$ \text{ par année}$$

Le coût de remplacement des garnitures de tiges, y compris les coûts de main-d'oeuvre et de matériaux, est estimé à 300$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{300\ \$}{100{,}24\$}$$

$$= 2{,}99 \text{ ans}$$

En plus d'être rentable, cette solution comporte un autre avantage. Sans graisseur en bon état, les fuites actuelles ne feraient qu'empirer, tandis que d'autres garnitures se mettraient à fuir; cela entraînerait des pertes supplémentaires d'air comprimé et, éventuellement, un moins bon rendement des vérins.

Possibilités d'amélioration de coût modique

Par possibilités d'amélioration de coût modique, on entend des initiatives de gestion de l'énergie qui sont réalisées une seule fois, et dont le coût n'est pas élevé. Comme exemple de possibilités d'amélioration de coût modique, mentionnons:

1. isolation à la surface des réservoirs;
2. installation de régulateurs de débit, de soupapes de réduction de pression ou même de robinets pour régler le débit d'eau ou d'air au niveau minimum acceptable;
3. revue des besoins de pompage et diminution du diamètre de l'impulseur actuel, ou encore installation d'un nouvel impulseur.
4. remplacement des pompes existantes par des pompes à haut rendement.

Exemples concrets de possibilités d'amélioration de coût modique

1. Isolation à la surface des réservoirs

La direction se souciait de la chaleur qui s'échappait par la surface d'un réservoir ouvert, à parois isolées, contenant 2 900 kg d'une solution de bichromate de sodium à 94°C. Le débit de vapeur acheminée vers le réservoir fut mesuré afin d'établir les besoins de vapeur pour maintenir le contenu du réservoir à la température désirée.

Pour remédier à cette situation, la direction décida d'ajouter des balles de polypropylène de 50 mm dans le réservoir de façon à recouvrir la surface du liquide. Ensuite, le nouveau débit de vapeur fut mesuré.

Besoins de vapeur sans les balles de polypropylène	825 kg/h
Besoins de vapeur avec les balles en polypropylène	350 kg/h
Économies de vapeur à l'heure	465 kg/h
Coût de la vapeur	22$/1 000 kg

Nombre d'heures de chauffage annuel = 5 040 h/an

Économie annuelle de vapeur = 465 kg/h × 5 040 h/an

= 2 343 600 kg

Économies annuelles = 2 343 600 kg × 22$/1 000 kg

= 51 559$

Le coût des balles de polypropylène est de 3 000$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{3\,000\$}{51\,559\$}$$

= 0,058 année (22 jours)

2. Régulateurs de débit

Le vestiaire d'un YM/YWCA comportait 12 douches de type à écoulement libre. Le débit était de 0,284 L/s par tête de douche. L'eau chaude pour les douches était maintenue à 48°C par des chauffe-eau électriques, puis abaissée à une température plus convenable par de l'eau à 10°C en provenance du réseau d'aqueduc. Pour simplifier les calculs, il fut estimé que toutes les têtes de douche fonctionnaient 4 heures par jour. De plus, il fut estimé que 75% de l'eau utilisée était de l'eau chaude à 48°C. Enfin, le YM/YWCA était ouvert 350 jours par année.

Pour réaliser des économies d'énergie et diminuer la consommation d'eau, des têtes de douche à écoulement réduit furent installées de façon à porter le débit par tête à 0,1895 L/s.

Consommation d'eau chaude avec des têtes à écoulement libre

12 têtes × 0,284 L/s × 3 600 s/h × 4 h/j × 350 j/an × 0,75 = 12 882 240 L/an d'eau à 48°C.

Consommation d'eau chaude avec des têtes à écoulement réduit

12 têtes × 0,1895 L/s × 3 600 s/h × 4 h/j × 350 j/an × 0,75 = 8 595 720 L/an d'eau à 48°C

Diminution possible de la consommation d'eau chaude = 12 882 240 — 8 595 720

= 4 286 520 L/an d'eau à 48°C

Comme les conduites de distribution d'eau chaude étaient courtes et bien isolées et que l'eau était chauffée électriquement, le pourcentage d'efficacité de conversion entre l'électricité et l'eau chaude était 100%. Un litre d'eau = 1kg.

Enthalpie de l'eau à 48°C 200,89 kJ/kg

Enthalpie de l'eau à 10°C 41,99 kJ/kg

L'énergie calorifique requise pour chauffer 4 286 520 litres d'eau de 10° à 48°C correspond à la diminution de la consommation d'eau multipliée par la différence d'enthalpie.

Énergie calorifique requise = 4 286 520 kg × (200,89 — 41.99) kJ/kg

= 681 128 028 kJ

$$\text{ou } \frac{681\ 128\ 028\ \text{kJ}}{1\ 000\ \text{kJ/MJ}}$$

= 681 128,028 MJ

1 kWh = 3,6 MJ

$$\text{Énergie électrique nécessaire} = \frac{681\ 128{,}028\ \text{MJ}}{3{,}6\ \text{MJ/kWh}}$$

= 189 202 kWh

L'électricité se vend 0,05$ le kWh.

Diminution annuelle des coûts = 189 202 kWh × 0,05$/kWh

= 9 460$

Le coût estimé d'achat et d'installation de 12 têtes de douche à écoulement réduit était de 1 500$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{1\ 500\$}{9\ 460\$}$$

= 0,16 année (2 mois)

3. Revue des besoins de pompage

En réduisant le nombre d'appareils consommateurs d'eau, le débit et la charge d'une pompe peuvent être réduits.
Conditions :

Élément	Besoins antérieurs	Nouveaux besoins
Charge totale	895 kPa (eff.)	671 kPa (eff.)
Débit	31,5 L/s	25,2 L/s

Selon la courbe du rendement de la pompe existante (Figure 4), il est possible de satisfaire à de nouvelles exigences en réduisant le diamètre de l'impulseur de 207,9 mm à 190,5 mm.

Les nouveaux besoins de puissance s'expriment de la manière suivante :

Besoins de puissance antérieurs 41,03 kW

Nouveaux besoins de puissance 26,11 kW

Heures d'utilisation de la pompe 3 500 h/an

Économie d'énergie = (41,03 — 26,11) kW × 3 500 h/an

= 52 220 kWh par année

L'électricité se vend 0,05$ le kWh.

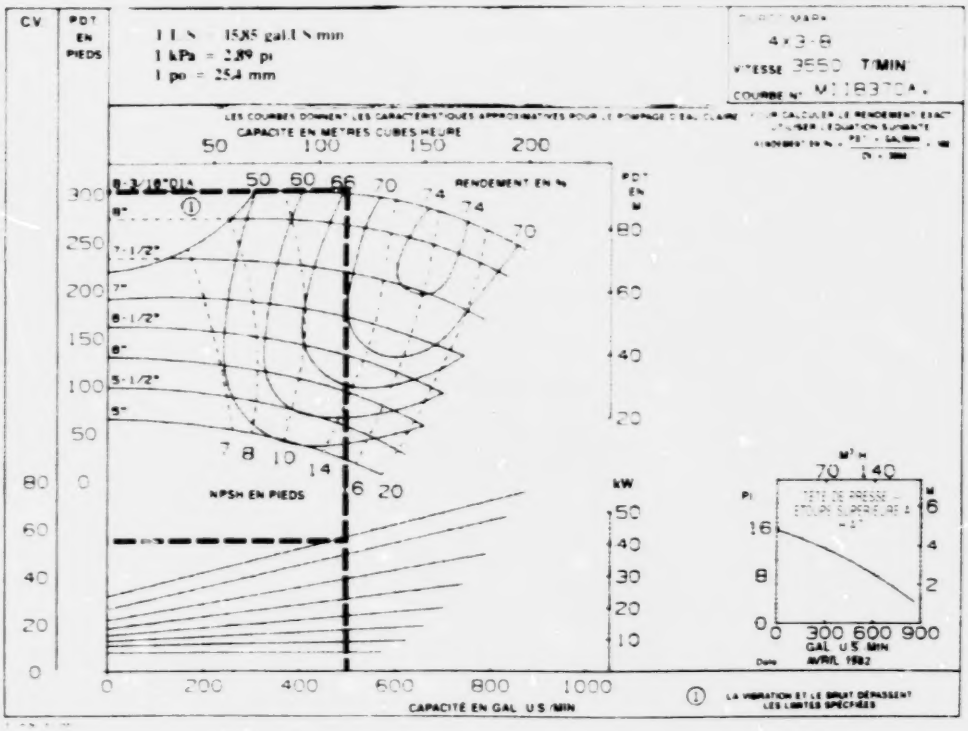
Économies annuelles = 52 220 kWh × 0,05$/kWh

= 2 611$

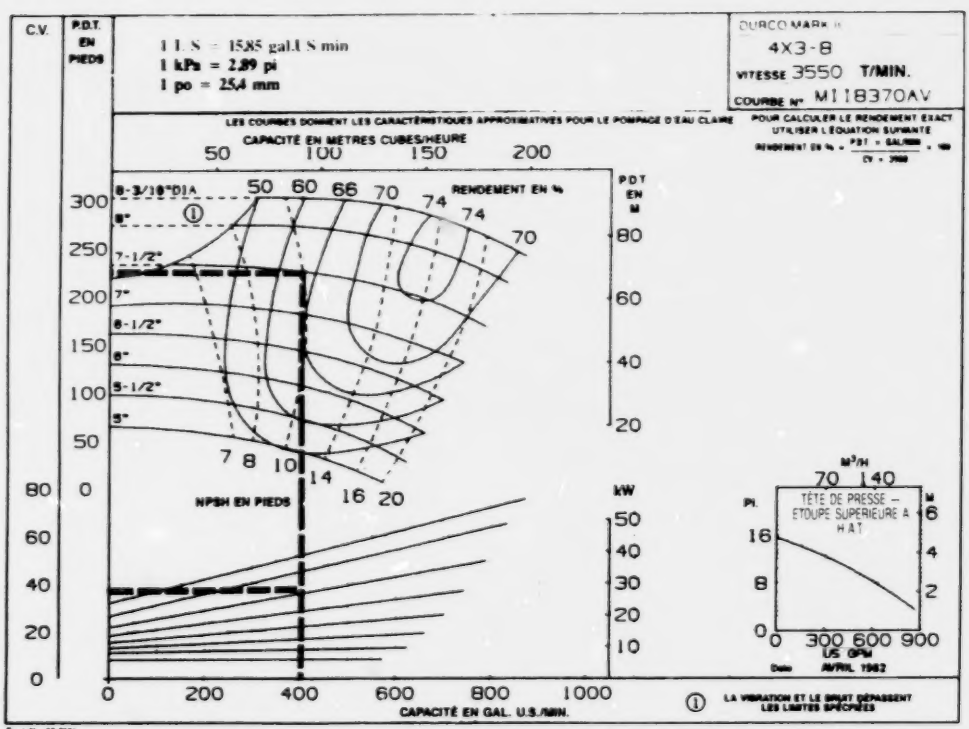
Les coûts pour réduire le diamètre de l'impulseur, y compris les coûts de démontage et de remontage, sont estimés à 500$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{500\$}{2\,611\$}$$

= 0,19 année (3 mois)



Besoins antérieurs



Nouveaux besoins

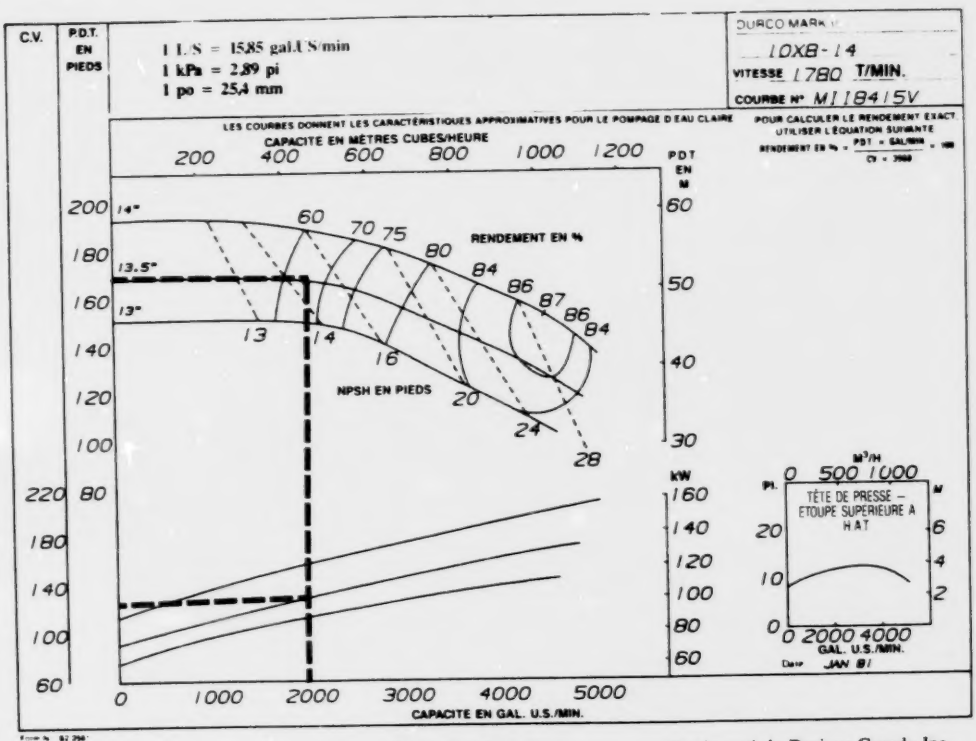
Gracieuseté de Duriron Canada Inc.

Figure 4

4. Pompes à haut rendement

Au cours d'une revue des besoins de pompage d'une grande usine, on s'était rendu compte qu'une pompe à eau utilisée depuis de nombreuses années serait appelée à être remplacée prochainement. À l'aide de la courbe de rendement de cette pompe (Figure 5), on avait établi la fiche technique suivante:

Entrée	250 mm
Sortie	200 mm
Diamètre de l'impulseur	337,5 mm
Charge totale	507 kPa (eff.)
Débit	126 L/s
Puissance nécessaire	100,7 kW à 1 780 tr/min
Efficacité	65 %



Pompe existante
Figure 5

Gracieuseté de Duriron Canada Inc.

Plutôt que d'acheter une pompe de remplacement en tous points identiques, il fut proposé d'étudier la possibilité d'acheter une pompe à haut rendement.

Après avoir établi que la charge totale et le débit devaient demeurer les mêmes, il fut choisi une pompe présentant les caractéristiques suivantes (Figure 6):

Entrée	200 mm
Sortie	150 mm
Diamètre de l'impulseur	347 mm
Charge totale	507 kPa (eff.)
Débit	126 L/s
Puissance nécessaire	89,5 kW à 1 780 tr/min
Efficacité	71 %

L'installation d'une pompe à haut rendement permettrait de diminuer la consommation d'énergie dans les proportions suivantes:

$$\text{Économie de puissance} = 100{,}7 - 89{,}5$$

$$= 11{,}2 \text{ kW}$$

La pompe fonctionne 4 000 heures par année et le coût de l'énergie est de 0,05$ le kWh.

$$\text{Économies annuelles} = 11{,}2 \text{ kW} \times 4\,000 \text{ h/an} \times 0{,}05\$/\text{kWh}$$

$$= 2\,240\$ \text{ par année}$$

Les conduites d'aspiration et de refoulement de la pompe devaient être rénovées au coût de 1 500$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{1\,500\$}{2\,240\$}$$

$$= 0{,}67 \text{ année (8 mois)}$$

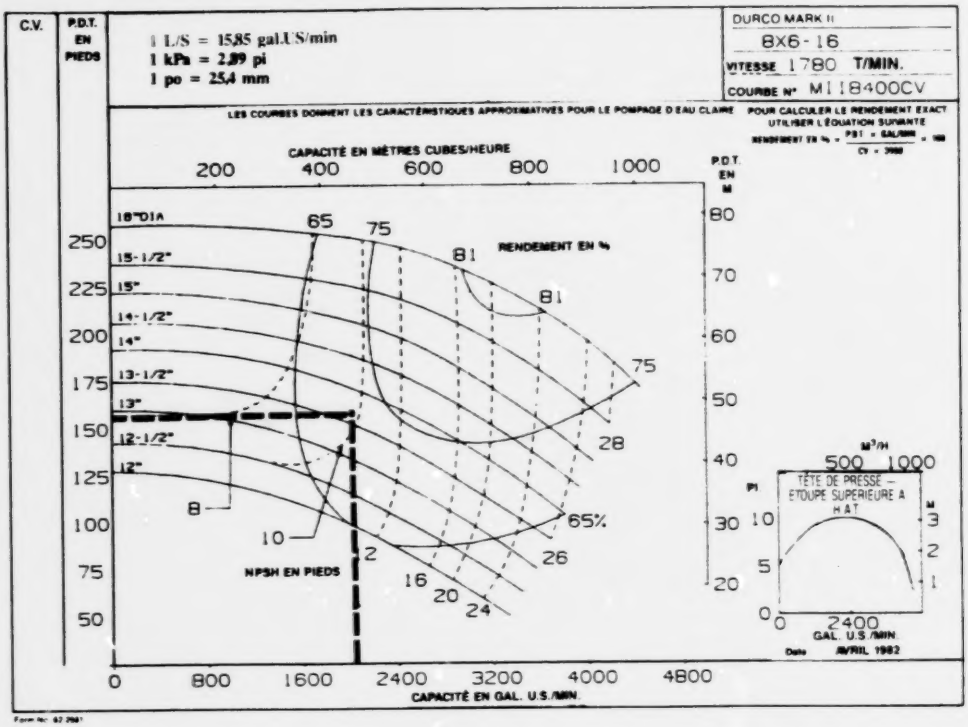
Le coût en capital pour l'achat d'une nouvelle pompe fut exclut du calcul de la période de rentabilisation parce que la pompe devait être remplacée de toute façon. De plus, le coût de la pompe choisie serait identique à celui de la pompe à bas rendement.

Possibilités de rénovation

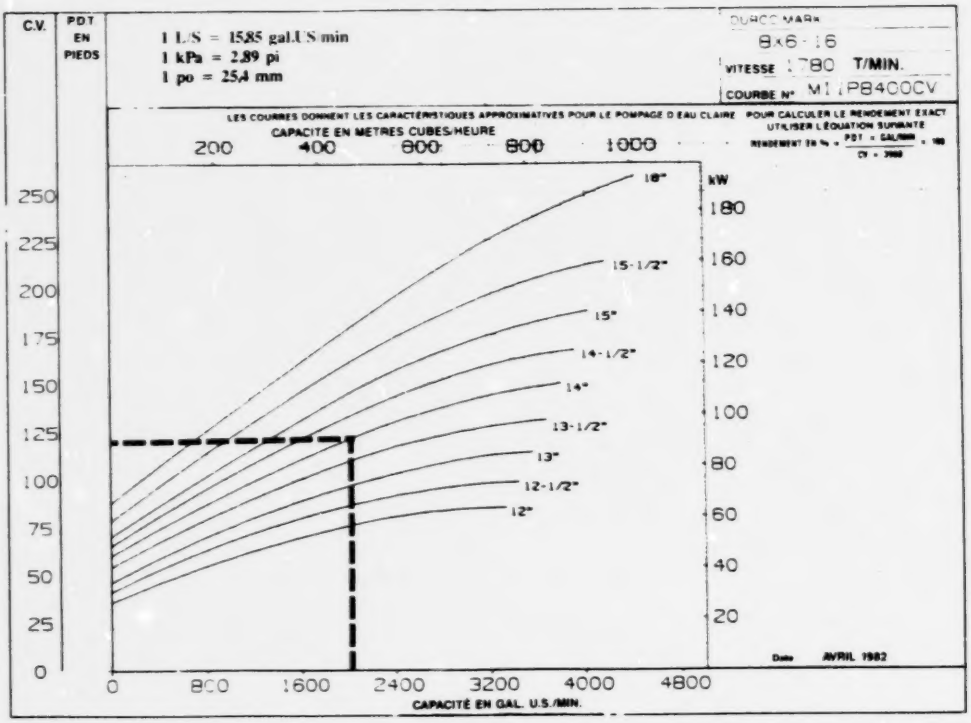
Par possibilités de rénovation, on entend des initiatives de gestion de l'énergie qui sont réalisées une seule fois et dont le coût est important.

Il existe un grand nombre de possibilités dans cette catégorie qui doivent être examinées attentivement par des spécialistes. Elles ne seront pas toutes discutées dans ce module. Dans certains cas, on donnera des exemples concrets, alors que dans d'autres cas, on se limitera à des commentaires. Parmi ces possibilités, mentionnons:

1. revue de l'énergie perdue dans les effluents d'une installation;
2. revue du réseau de distribution au complet dans le but de diminuer tout écoulement excessif ou superflu;
3. installation d'éliminateurs de brouillard dans les tours de refroidissement pour diminuer les pertes par dérive et réduire au minimum les besoins de compensation d'eau;



Pompe existante



Pompe proposée Gracieuseté de Duriron Canada Inc.

Figure 6

4. installation de sécheurs d'air pour éliminer l'humidité dans les conduites d'air;
5. remplacement de la tuyauterie actuelle par une tuyauterie d'un matériau offrant des pertes de charge par frottement moins importantes;
6. isolation des conduites d'eau chaude et d'eau froide pour éliminer les pertes ou gains thermiques;
7. conversion des systèmes de refroidissement sans recyclage en systèmes de refroidissement avec recyclage comportant une tour de refroidissement ou d'un refroidisseur évaporatif.
8. installation de pompes de surpression pour répondre aux besoins des appareils isolés nécessitant une plus haute pression, plutôt que d'alimenter tout le réseau à haute pression.
9. installation de matériel de filtration à faible perte de charge;
10. installation de systèmes de traitement des eaux en usine pour permettre de recycler les eaux usées;
11. installation de réservoirs d'air près des appareils nécessitant une plus grande quantité d'air comprimé;
12. remplacement des compresseurs d'air actuels par de nouveaux compresseurs à haut rendement;
13. installation de réservoirs de dilatation aux réseaux de distribution;
14. remplacement des soupapes et raccords à perte de charge élevée pour diminuer les pertes par frottement.

Exemples concrets de possibilités de rénovation

1. Récupération de la chaleur des eaux usées

Les eaux usées à la sortie d'une usine peuvent renfermer de l'énergie calorifique qui peut être réutilisée pour diminuer les besoins énergétiques. L'eau de refroidissement usée d'une installation était renvoyée à l'égout par crainte de contamination. Le débit d'eau usée était de 20 L/s à 30°C. L'installation devait aussi chauffer 15 L/s d'eau de 20 à 80°C pour les procédés à l'aide d'un échangeur de chaleur vapeur/eau. L'échangeur de chaleur utilisait de la vapeur sèche et saturée à 700 kPa (abs.)

Il y avait une possibilité de récupérer une certaine partie de l'énergie calorifique de l'eau usée en préchauffant l'eau pour procédés en amont de l'échangeur de chaleur. Cela pouvait se faire à l'aide d'un second échangeur de chaleur (Figure 7).

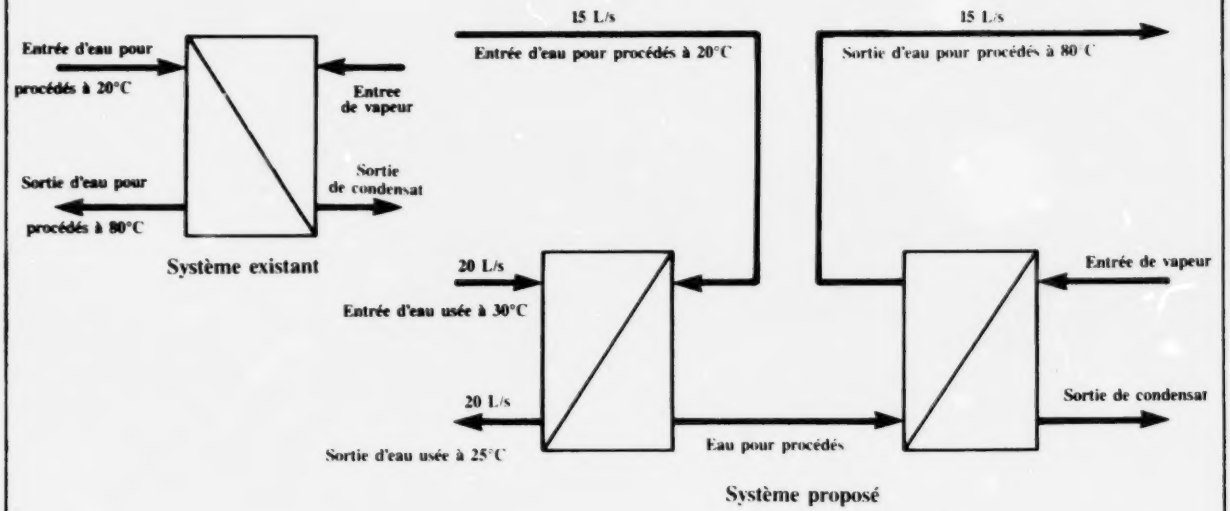


Figure 7

La température de l'eau usée diminuerait de 5°C. L'efficacité du transfert de chaleur de l'échangeur de chaleur était de 80% tant pour l'échangeur de chaleur existant que pour celui envisagé.

L'équation que l'on a utilisé pour calculer le transfert approximatif de chaleur par l'eau à la température normale de système de chauffage est la suivante:

$$Q = f_w \times (t_1 - t_2) \times 15$$

ou Q = chaleur totale transférée (MJ/h)

f_w = débit de l'eau (L/s)

t_1 = température de l'eau d'arrivée (°C)

t_2 = température de l'eau de sortie (°C)

15 = multiplicateur qui tient compte de la chaleur spécifique de l'eau et de la conversion à des unités communes.

Cette équation donne les résultats suivants:

f_w 20 L/s

t_1 30°C

t_2 25°C

$$Q = 20 \times (30 - 25) \times 15$$

$$= 1\,500 \text{ MJ/h}$$

$$\text{ou } \frac{1\,500 \text{ MJ/h}}{3\,600 \text{ s/h}} = 0{,}416 \text{ MJ/s}$$

Avec un échangeur de chaleur d'une efficacité de 80%, la chaleur récupérable des effluents d'eau pour les procédés est la suivante:

Chaleur disponible = 0,416 MJ/s × 0,8

= 0,333 MJ/s

Pour compléter le calcul, il faut connaître l'enthalpie de la vapeur. Pour ce faire, la table de vapeur (Table 8) doit être consultée.

Enthalpie de la vapeur à 700 kPa (abs.) 2 762,0 kJ/kg

Enthalpie du condensat à 700 kPa (abs.) 697,1 kJ/kg

Chaleur disponible de la vapeur = 2 762,0 — 697,1

= 2 064,9 kJ/kg

Calculée en fonction d'un échangeur de chaleur présentant un taux d'efficacité de 80%, la chaleur disponible pour l'eau pour les procédés est la suivante:

Chaleur disponible = 2 064,9 kJ/kg × 0,8

= 1 651,9 kJ/kg

$$\text{ou } \frac{1\,651{,}9 \text{ kJ/kg}}{1\,000 \text{ kJ/MJ}} = 1{,}6519 \text{ MJ/kg}$$

Diminution de la consommation de vapeur obtenue par l'ajout de la chaleur récupérée dans les effluents d'eau usée $= \frac{0{,}333 \text{ MJ/s}}{1{,}6519 \text{ MJ/kg}}$

$= 0{,}20$ kg/s

L'usine est exploitée 6 000 heures par année.

Économie annuelle de vapeur $= 0{,}20$ kg/s $\times$ 3 600 s/h $\times$ 6 000 h/an

$= 4\ 320\ 000$ kg de vapeur à 700 kPa (eff.)

Sachant que le coût de la vapeur est de 22$/1 000 kg, les économies réalisables sont alors les suivantes:

Économies annuelles $= 4\ 320\ 000 \times 22\$/100$

$= 95\ 040\$$ par année

Les coûts estimés de fourniture et d'installation du nouvel échangeur de chaleur, y compris les modifications des conduites, sont de 40 000$.

Période de rentabilité $= \frac{40\ 000\$}{95\ 040\$}$

$= 0{,}42$ année (5 mois)

2. Diminution de la consommation d'air

En passant en revue le réseau de distribution d'air d'une installation, on avait remarqué que, malgré la fermeture d'un service deux ans auparavant, les principales conduites d'air qui passaient dans cette zone étaient toujours sous pression de 600 kPa (eff.). Il fut également noté que certains raccords fuyaient. Comme la direction avait prévu à long terme transformer cette zone en entrepôt pour matières premières, elle décida d'enlever toutes les conduites d'air. De cette façon, elle diminuait les pertes d'air, les coûts de réparation des fuites et certains autres frais de maintenance.

Il fut estimé que les fuites d'air équivalaient à un orifice d'un diamètre de 5 mm. La Table 6 indique que le débit de la fuite d'air est de 26,7 L/s, au coût de 298$ par mois.

Le système est sous pression 8 760 heures par année.

Perte totale d'air $= 26{,}7$ L/s $\times$ 3 600 s/h $\times$ 8 760 h/an

$= 842\ 011\ 200$ L/an

ou $\frac{842\ 011\ 200 \text{ L/an}}{1\ 000 \text{ L/m}^3}$

$= 842\ 011$ m^3/an

L'élimination de cette fuite d'air permet d'utiliser l'air ainsi économisé à d'autres fins.

Les économies annuelles sont les suivantes·

Économies annuelles $= 12 \times 298\$$

$= 3\ 576\$$

Les coûts estimés d'enlèvement des conduites, moins leur valeur de récupération, s'élèvent à 4 200$.

Période de rentabilité $= \frac{4\ 200\$}{3\ 576\$}$

$= 1{,}2$ année

3. Éliminateurs de brouillard dans les tours de refroidissement

Un éliminateur de brouillard ou de dérive de gouttelettes peut diminuer les pertes d'eau d'une tour de refroidissement. En effet, cet appareil permet de réduire la quantité d'eau de compensation nécessaire au maintien du niveau d'eau dans le circuit de la tour de refroidissement.

Il importe de toujours consulter le fabricant de la tour de refroidissement avant de prendre quelque initiative que ce soit dans ce domaine.

4. Sécheurs d'air comprimé

La présence d'eau dans des conduites d'air comprimé favorise la corrosion de même qu'une augmentation de la perte de charge. Cependant, il est possible d'en diminuer l'importance par l'installation de sécheurs d'air. Dépendant de l'utilisation et du degré d'humidité de l'air, les manufacturiers peuvent recommander le type de sécher d'air à acheter. De plus, il faut vérifier si les installations existantes doivent être modifiées pour permettre l'installation des sécheurs.

5. Conduites de plus faible perte de charge par frottement

Les conduites et accessoires en service depuis longtemps sont souvent oxydés en raison d'un mauvais traitement de l'eau, ou encore de la présence d'impuretés transportées par l'eau dans les conduites d'air. Lorsque la corrosion ou l'entartrage nécessite le remplacement de certaines conduites ou du réseau complet, il importe d'étudier la possibilité d'utiliser des conduites fabriquées à partir d'un matériau présentant un plus faible coefficient de frottement. La décision pourrait avoir des effets bénéfiques importants sur les pertes de charge par frottement de même que sur les besoins énergétiques des pompes ou compresseurs. La période de rentabilité régit la prise de décision.

6. Isolation de la tuyauterie

Une conduite nue transportait de l'eau à 75°C vers une zone de lavage à une température ambiante de 20°C. La conduite, d'un diamètre nominal de 6 pouces, avait 150 mètres de long, tandis que l'eau était chauffée par des chauffe-eau à immersion à commande électrique.

La Table 4 indique que la perte de chaleur de cette conduite est de 360 W par mètre linéaire à l'heure.

$$\text{Perte de chaleur à l'heure (conduite nue)} = 360 \times 150$$

$$= 54\,000 \text{ W}$$

D'après les tables du Module 1, Isolation thermique des équipements, l'utilisation d'un isolant en fibre de verre de 51 mm d'épais sans enveloppe diminuerait la perte de chaleur à 22,0 W par mètre linéaire à l'heure. Ainsi, les pertes totales de chaleur à l'heure de la conduite isolée s'élèvent à:

$$\text{Perte de chaleur à l'heure (conduite isolée)} = 22{,}0 \times 150$$

$$= 3\,300 \text{ W}$$

$$\text{Économies de chaleur à l'heure} = 54\,000 - 3\,300$$

$$= 50\,700 \text{ W}$$

$$\text{ou } \frac{50\,700 \text{ W}}{1\,000 \text{ W/kW}}$$

$$= 50{,}7 \text{ kW}$$

Le coût de l'électricité est de 0,05$/kWh.

$$\text{Économies d'électricité à l'heure} = 50{,}7 \times 0{,}05\$$$

$$= 2{,}54\$$$

Ce système fonctionne 8 760 heures par année.

Économies annuelles = 2,54$ × 8 760

= 22 250$/an

Les coûts du matériau isolant, installation comprise, sont estimés à 6 000$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{6\,000\$}{22\,050\$}$$

= 0,27 année (4 mois)

7. Système de refroidissement en circuit fermé (avec recyclage)

Lorsque l'eau de refroidissement n'est pas contaminée, il peut se révéler avantageux de transformer un système sans recyclage en un système avec recyclage à l'aide d'une tour de refroidissement ou de tout autre moyen de refroidissement par évaporation, comme un étang de refroidissement. Dans un système avec recyclage, l'eau est refroidie par évaporation de façon naturelle ou forcée, puis réutilisée. Les appareils ou dispositifs utilisés à cette fin sont capables d'accepter des débits d'eau de l'ordre de 6 L/s ou plus. Il convient de toujours consulter les fabricants de tours de refroidissement, ou encore des ingénieurs, avant d'entreprendre des projets de ce genre.

8. Pompes de surpression

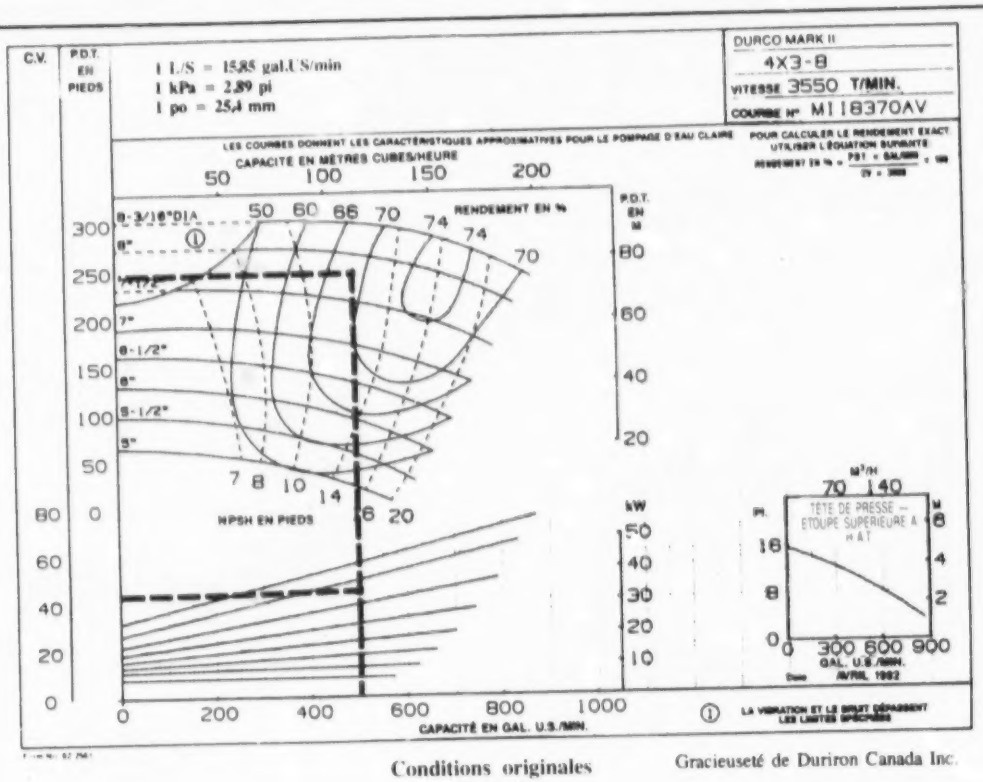
Lors d'une analyse au passage d'une installation, on avait remarqué que la pression de refoulement d'une pompe à eau de refroidissement était maintenue à 620 kPa (eff.) pour répondre aux besoins d'un seul appareil, alors que tous les autres appareils n'avaient besoin que d'une pression maximum de 447 kPa (eff.). Le débit total d'eau était de 31,5 L/s, tandis que celui en direction de l'appareil nécessitant une plus forte pression était de 8 L/s. Il avait été convenu qu'une analyse de diagnostic devait être effectuée pour établir la viabilité d'un projet visant à réduire la pression du réseau à 447 kPa (eff.) et à installer une pompe de surpression pour augmenter la pression de l'appareil en question de 447 à 620 kPa (eff.). Aucun réservoir tampon n'était requis puisque l'eau circulait en continu.

Principale pompe d'alimentation — Conditions originales (Figure 8)

Débit	31,5 L/s
Charge totale	746 kPa (eff.)
Puissance nécessaire	37,3 kW à 3 600 tr/min

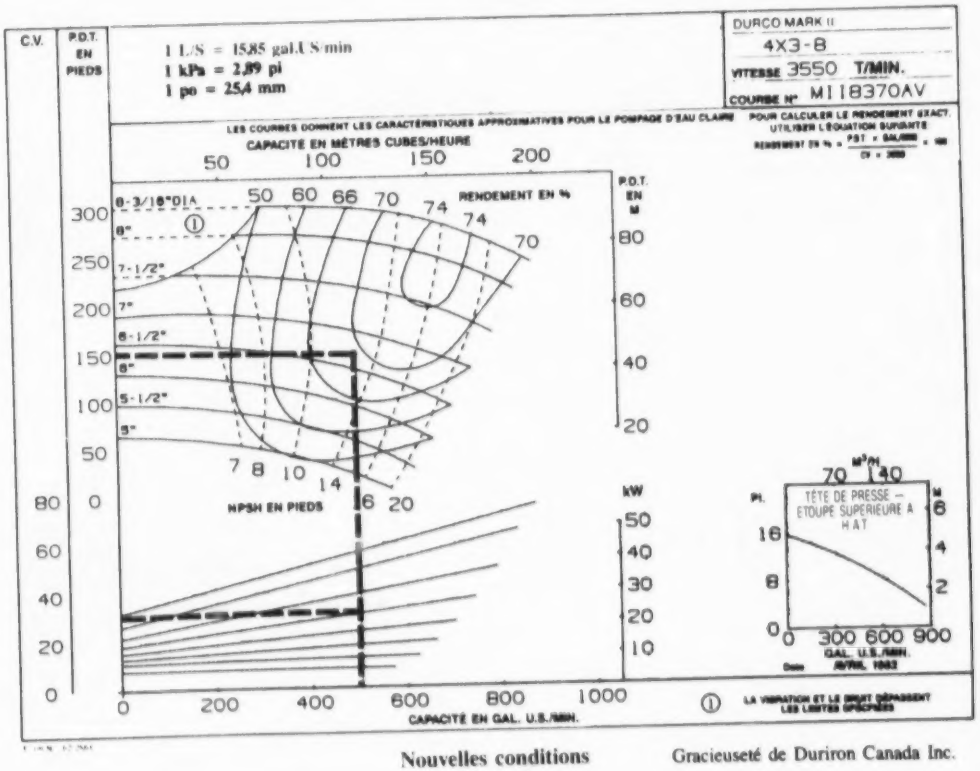
Principale pompe d'alimentation — Nouvelles conditions (Figure 9)

Débit	31,5 L/s
Charge totale	447 kPa (eff.)
Puissance nécessaire	18,65 kW à 3 600 tr/min



Conditions originales Gracieuseté de Duriron Canada Inc.

Figure 8



Nouvelles conditions Gracieuseté de Duriron Canada Inc.

Figure 9

Pompe de surpression	—	Conditions (Figure 10)
Débit		8 L/s
Pression de refoulement		746 kPa (eff.)
Pression d'aspiration		447 kPa (eff.)
Pression différentielle		299 kPa
Puissance nécessaire		4 kW à 3 600 tr/min

Ces appareils fonctionnent 24 heures par jour, 200 jours par année tandis que l'électricité se vend 0,05$ le kWh.

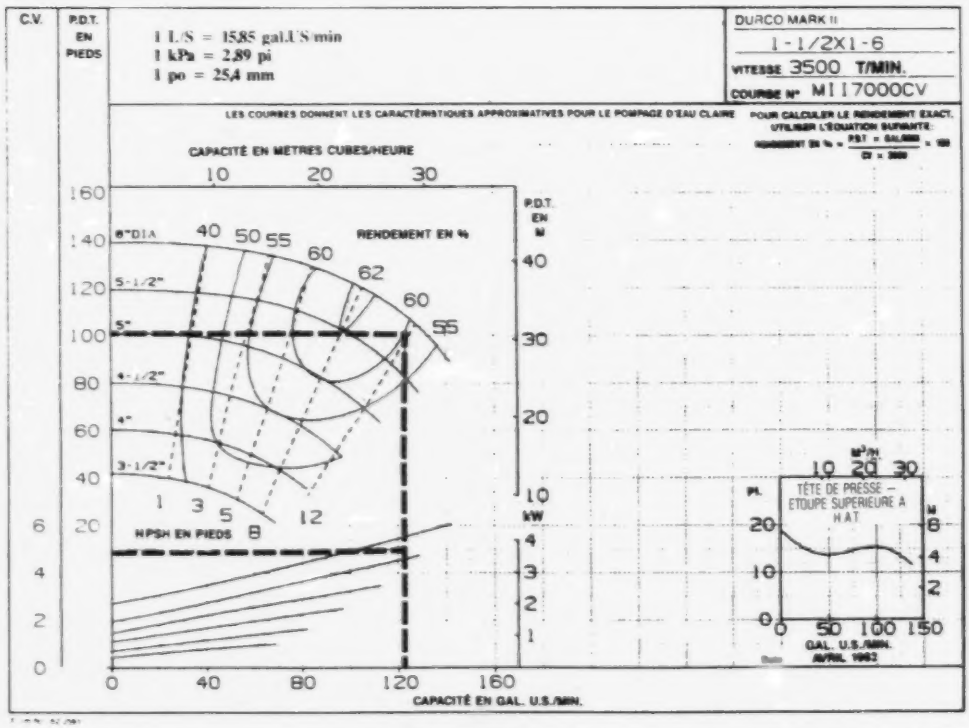
Économies annuelles = 24 h/j × 200 j/an × (37,3 — (18,65 + 4))kW × 0,05$/kWh

= 3 516$ par année

Les coûts estimés pour l'achat et l'installation de la pompe de surpression, y compris le remplacement des conduites, le câblage et les modifications de l'impulseur de la pompe existante, étaient de 8 500$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{8\,500\$}{3\,516\$}$$

= 2,42 années



Pompe de surpression
Figure 10

Gracieuseté de Duriron Canada Inc.

9. Filtres de faibles pertes de charge

Les filtres utilisés pour filtrer les matières solides en suspension dans l'eau et dans l'air doivent être adaptés à la taille des particules qu'ils sont chargés de retenir. Plus les mailles sont fines, plus la perte de charge est grande et plus les risques d'obstruction sont élevés. Plus la perte de charge est élevée, plus la consommation d'énergie est grande pour obtenir la pression désirée et plus les frais sont importants.

10. Traitement de l'eau en usine

En passant en revue le réseau de distribution d'eau d'une usine, on s'était rendu compte qu'il y avait deux conduites qui se déversaient directement à l'égout en raison de risques de contamination. Le débit total était estimé à 3,15 L/s. De plus, il avait été établi qu'il y avait eu, au cours des 12 derniers mois, seulement deux cas de contamination et qu'ils avaient tous deux été corrigés dans les 8 heures qui avaient suivi la détection de la contamination. Il s'agissait donc d'un cas où il y avait possibilité de réutilisation de l'eau, à condition qu'elle ne soit pas contaminée.

Des discussions avec différents fournisseurs avaient révélé qu'on pouvait installer un conductivimètre pour mesurer le degré de contamination des eaux usées de cette usine. Un dispositif de régulation commanderait une première soupape pour détourner l'eau contaminée vers l'égout, puis en ouvrirait une seconde pour alimenter l'usine en eau fraîche. En même temps, un système d'alarme avertirait le personnel d'exploitation de la présence de contaminants.

L'usine est exploitée 6 000 heures par année.

$$\text{Économies annuelles d'eau} = (6\,000\ \text{h/an} - 16\ \text{h/an}) \times 3{,}15\ \text{L/s} \times 3\,600\ \text{s/h}$$

$$= 67\,858\,560\ \text{L/an}$$

Comme l'eau est achetée directement de la municipalité, des économies seront réalisées au niveau de la taxe d'eau. De plus, la municipalité fera également des économies d'énergie puisqu'elle aura moins d'eau à fournir et, par conséquent, moins d'eau à traiter.

Si l'on tient compte que l'eau se vend 0,41$/m^3, les économies réalisables au niveau de l'achat de l'eau se formulent ainsi:

$$\text{Économies annuelles} = \frac{67\,858\,560\ \text{L/an} \times 0{,}41\$/\text{m}^3}{1\,000\ \text{L/m}^3} = 27\,822\$/\text{an}$$

Le coût estimé du conductivimètre, des soupapes et des dispositifs de régulation est de 9 000$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{9\,000\$}{27\,822\$}$$

$$= 0{,}323\ \text{année (4 mois)}$$

11. Réservoir tampon pour réseaux d'air comprimé

Les réservoirs servent à emmagasiner de l'air comprimé pour répondre aux divers besoins de la demande et pour diminuer le travail du compresseur. Règle générale, les réservoirs sont installés près du compresseur. Cependant, des réservoirs supplémentaires peuvent être installés près des appareils nécessitant une plus grande quantité d'air de façon à diminuer les fluctuations de pression dans le réseau de distribution. En ajoutant des réservoirs supplémentaires là où le besoin s'en fait sentir, on peut généralement diminuer la pression d'alimentation générale du réseau et, par le fait même, la consommation d'énergie.

12. Compresseurs d'air à haut rendement

Avant d'acheter un compresseur d'air, il est recommandé d'examiner les différents appareils offerts sur le marché et de choisir, compte tenu du budget, le modèle qui offre le meilleur rendement énergétique. Pour plus de renseignements à ce sujet, voir le Module 14, Compresseurs et turbines.

13. Réservoirs de dilatation pour les réseaux de distribution d'eau

Les réservoirs de dilatation installés dans les réseaux de distribution d'eau répondent à des besoins différents. Dans le cas des réseaux de distribution d'eau chaude, ces réservoirs servent à recueillir l'excédent d'eau provenant de la dilatation de l'eau causée par le chauffage du réseau. Sans réservoir de dilatation, la pression augmenterait au fur et à mesure que l'eau serait chauffée, ce qui amènerait l'eau à s'échapper par les soupapes de sûreté. Par la suite, lorsque le réseau se refroidirait et que l'eau se contracterait, il faudrait ajouter de l'eau de compensation.

Dans le cas des réseaux de distribution d'eau froide, les réservoirs de dilatation sont généralement utilisés comme réservoirs tampons et répondent à deux besoins: d'abord emmagasiner de l'eau, puis diminuer les fluctuations de la pression à l'intérieur du réseau.

Dans les deux cas, il existe des possibilités d'économies parce que les réservoirs de dilatation permettent de diminuer les besoins de pompage et, par conséquent, la consommation d'énergie.

14. Diminution des pertes de charge

La Table 3 fait voir que la longueur équivalente de conduite varie en fonction des soupapes et accessoires. Par exemple, la longueur équivalente pour un robinet à soupape fileté d'un diamètre nominal de 2 pouces est de 16,46 mètres, tandis que celle d'un robinet-vanne fileté d'un diamètre nominal de 2 pouces est de 0,46 mètres. Ainsi, si on remplace 10 robinets à soupapes par 10 robinets-vannes dans un réseau de distribution d'eau dont les conduites ont un diamètre nominal de 2 pouces, les économies réalisables au niveau de la longueur équivalente de conduite sont les suivantes:

$$\text{Économies au niveau de la longueur équivalente} = 10 \times (16{,}46 - 0{,}46)$$

$$= 10 \times (16)$$

$$= 160 \text{ mètres}$$

Si ce réseau a une perte de charge de 15,1 kPa (eff.) au 100 mètres, la diminution de la perte de charge est la suivante:

$$\text{Diminution de la perte de charge} = \frac{160}{100} \times 15{,}1 \text{ kPa (eff.)}$$

$$= 24{,}16 \text{ kPa (eff.)}$$

Ce système, s'il était mis en oeuvre et compte tenu du nombre de raccords remplacés, permettrait de réaliser des économies très substantielles.

ANNEXES

A Glossaire
B Tables
C Conversions courantes
D Feuilles de travail

Glossaire

Air comprimé — Air renfermé dans un réseau de distribution à un pression supérieure à la pression atmosphérique.

Analyse au passage — Inspection visuelle d'une installation pur étudier la consommation de l'énergie.

Analyse de diagnostic — Analyse d'une possibilité d'économie d'énergie pouvant comporter l'évaluation du fonctionnement du processus, le calcul des économies possibles et l'évaluation des frais d'immobilisation et des coûts d'exploitation afin de calculer la rentabilité.

Conduites en polychlorure de vinyle — Conduites fabriquées à partir du matériau le plus utilisé pour les conduites de plastique. Résistent très bien à la corrosion. Offrent d'excellentes propriétés physiques. Température maximum de service: 60°C.

Conduites en polychlorure de vinyle chloré (CPVC) — Conduites fabriquées à partir d'un matériau analogue à celui des conduites en polychlorure de vinyle. Température maximum de service : 99°C.

Énergie — Grandeur caractérisant l'aptitude d'un système physique à fournir un travail. L'énergie existe sous différentes formes transformables: énergie thermique (chaleur), mécanique (travail), électrique et chimique. L'énergie est mesurée en kilowatt heures (kWh) ou en mégajoules (MJ).

Énergie calorifique — Forme d'énergie transférée d'un point de température supérieure à une point de température inférieure. Exprimée en MJ/kg.

Énergie gaspillée — Énergie dissipée sans avoir été pleinement utilisée.

Énergie variable — Consommation d'énergie liée à la production.

Enthalpie — Quantité de chaleur contenue dans un corps par unité de masse, exprimée en kJ/kg.

Intensité énergétique — Quantité d'énergie nécessaire à la fabrication d'un produit ou d'un groupe de produits, exprimée en énergie consommée par unité de production.

Point de rosée — Température à laquelle la vapeur se condense lorsqu'elle est refroidie à pression constante.

Possibilités d'amélioration de côut modique — Initiatives de gestion de l'énergie réalisées une seule fois, et dont le coût n'est pas élevé.

Possibilité de maintenance — Iniatives de gestion de l'énergie exécutées de façon périodique, au moins une fois par année.

Possibilités de rénovation — Initatives de gestion de l'énergie réalisés une seule fois, et dont le coût est élevé.

Pression absolue — Toute pression dont la base de mesure est le vide absolu. Exprimée en kPa (abs.).

Pression effective — Toute pression dont la base de mesure est la pression atmosphérique, exprimée en kPa (eff.). A noter que kPa (eff.) + pression atmosphérique = kPa (abs.).

Résistance thermique (R) — Coefficient indiquant les propriétés isolantes relatives, ou encore la résistance à la chaleur d'un matériaux ou d'un ensemble de matériaux. S'exprime en ($m^2 \cdot °C/W$).

Type d'énergie — Combustible ou forme d'énergie utilisé par une installation (exemples: pétrole, électricité et gaz naturel).

DEBIT D'EAU DANS UN TUYEAU EN ACIER DE CALIBRE 40
TABLE 1

Traduit du Crane Co.

Chute de pression par 100 mètres et vitesse dans un tuyau de calibre 40 lorsqu'l'eau est à 15 C

Débit	1/8"		1/4"		3/8"		1/2"		3/4"		1"		1 1/4"		1 1/2"	
Litres par minute	Vitesse Mètres par seconde	Chute de press. Bars	Vitesse Mètres par seconde	Chute de press. Bars	Vitesse Mètres par seconde	Chute de press. Bars	Vitesse Mètres par seconde	Chute de press. Bars	Vitesse Mètres par seconde	Chute de press. Bars	Vitesse Mètres par seconde	Chute de press. Bars	Vitesse Mètres par seconde	Chute de press. Bars	Vitesse Mètres par seconde	Chute de press. Bars
1	0.459	0.726	0.251	0.17												
2	0.918	2.59	0.501	0.60	0.272	0.136	0.170	0.044								
3	1.38	5.59	0.752	1.22	0.407	0.29	0.255	0.091	0.144	0.023						
4	1.84	9.57	1.00	2.09	0.543	0.48	0.340	0.151	0.192	0.038	0.120	0.012				
5	2.29	14.45	1.25	3.18	0.679	0.70	0.425	0.223	0.241	0.057	0.150	0.017				
6	2.75	20.29	1.50	4.46	0.815	0.98	0.510	0.309	0.289	0.077	0.180	0.024				
8	3.67	35.16	2.01	7.36	1.09	1.69	0.680	0.524	0.385	0.129	0.240	0.041	0.138	0.011		
10			2.51	11.81	1.36	2.52	0.850	0.798	0.481	0.193	0.300	0.061	0.172	0.015	0.127	0.008
15			3.76	25.67	2.04	5.37	1.28	1.69	0.722	0.403	0.450	0.124	0.258	0.032	0.190	0.015
20	2"		2 1/2"		2.72	9.24	1.70	2.84	0.962	0.683	0.600	0.210	0.344	0.054	0.254	0.026
30	0.231	0.016					2.55	6.17	1.44	1.45	0.900	0.442	0.517	0.114	0.380	0.053
40	0.308	0.027	0.216	0.010			3.40	10.72	1.92	2.50	1.20	0.758	0.689	0.193	0.507	0.091
50	0.385	0.039	0.270	0.017					2.41	3.83	1.50	1.14	0.861	0.290	0.634	0.135
60	0.462	0.055	0.324	0.023					2.89	5.41	1.80	1.61	1.03	0.400	0.761	0.187
70	0.539	0.098	0.378	0.031	3"		3 1/2"		3.37	7.27	2.10	2.15	1.21	0.541	0.888	0.248
80	0.616	0.092	0.432	0.039	0.280	0.014			3.85	9.27	2.40	2.76	1.38	0.690	1.01	0.315
90	0.693	0.115	0.486	0.048	0.315	0.017	0.235	0.008			2.70	3.47	1.55	0.862	1.14	0.397
100	0.770	0.141	0.540	0.059	0.350	0.020	0.261	0.010	4"		3.00	4.25	1.72	1.05	1.27	0.488
150	1.15	0.295	0.810	0.125	0.524	0.042	0.392	0.021	0.304	0.011	4.50	9.30	2.58	2.26	1.90	1.03
200	1.54	0.512	1.08	0.212	0.699	0.072	0.523	0.036	0.405	0.019	5"		3.44	3.91	2.54	1.81
250	1.92	0.773	1.35	0.322	0.874	0.108	0.653	0.053	0.507	0.028					3.17	2.74
300	2.31	1.10	1.62	0.449	1.05	0.152	0.784	0.074	0.608	0.040	0.387	0.014	6"		3.80	3.82
350	2.69	1.47	1.89	0.606	1.22	0.203	0.915	0.099	0.710	0.053	0.452	0.018			4.44	5.18
400	3.08	1.92	2.16	0.780	1.40	0.264	1.05	0.128	0.811	0.068	0.516	0.023	0.357	0.009	5.07	6.69
450	3.46	2.39	2.43	0.979	1.57	0.329	1.18	0.161	0.912	0.084	0.581	0.028	0.402	0.012	5.71	8.45
500	3.85	2.95	2.70	1.20	1.75	0.403	1.31	0.196	1.01	0.101	0.646	0.034	0.447	0.014		
550	4.23	3.55	2.97	1.44	1.92	0.479	1.44	0.232	1.11	0.122	0.710	0.041	0.491	0.016		
600	4.62	4.20	3.24	1.69	2.10	0.566	1.57	0.273	1.22	0.146	0.775	0.047	0.536	0.019		
650	5.00	6.88	3.51	1.97	2.27	0.658	1.70	0.319	1.32	0.169	0.839	0.055	0.581	0.022		
700	5.39	5.63	3.78	2.28	2.45	0.759	1.83	0.368	1.42	0.194	0.904	0.063	0.625	0.025		
750	5.77	6.44	4.05	2.60	2.62	0.863	1.96	0.420	1.52	0.218	0.968	0.072	0.670	0.029	8"	
800			4.32	2.95	2.80	0.977	2.09	0.473	1.62	0.246	1.03	0.081	0.715	0.032		
850			4.59	3.31	2.97	1.09	2.22	0.528	1.72	0.277	1.10	0.091	0.760	0.036	0.439	0.009
900					3.15	1.22	2.35	0.585	1.82	0.308	1.16	0.010	0.804	0.041	0.465	0.010
950					3.32	1.35	2.48	0.649	1.93	0.342	1.23	0.111	0.849	0.045	0.491	0.012
1000					3.5	1.50	2.61	0.714	2.03	0.377	1.29	0.122	0.894	0.049	0.516	0.013
1100					3.85	1.75	2.87	0.860	2.23	0.452	1.42	0.147	0.983	0.059	0.568	0.015
1200					4.20	2.14	3.14	1.02	2.43	0.534	1.55	0.172	1.07	0.069	0.620	0.018
1300							3.40	1.19	2.64	0.627	1.68	0.200	1.16	0.080	0.671	0.021
1400							3.66	1.37	2.84	0.722	1.81	0.232	1.25	0.091	0.723	0.024
1500							3.92	1.56	3.04	0.818	1.94	0.264	1.34	0.105	0.775	0.027
1600	10"						4.18	1.78	3.24	0.924	2.07	0.297	1.43	0.118	0.826	0.031
1700							4.44	1.99	3.45	1.04	2.19	0.331	1.52	0.132	0.878	0.035
1800	0.590	0.012							3.65	1.16	2.32	0.369	1.61	0.147	0.930	0.039
1900	0.622	0.014							3.85	1.28	2.45	0.410	1.70	0.163	0.981	0.042
2000	0.655	0.015							4.05	1.41	2.58	0.452	1.79	0.181	1.03	0.046
2200	0.721	0.018	12"						4.46	1.70	2.84	0.545	1.97	0.217	1.14	0.056
2400	0.786	0.021									3.10	0.645	2.14	0.253	1.24	0.065
2600	0.852	0.025	0.600	0.010							3.36	0.749	2.32	0.296	1.34	0.076
2800	0.917	0.028	0.646	0.012	14"						3.61	0.859	2.50	0.339	1.45	0.087
3000	0.983	0.032	0.692	0.013	0.573	0.008					3.87	0.982	2.68	0.387	1.55	0.099
3500	1.15	0.043	0.810	0.018	0.668	0.011	16"				4.52	1.33	3.13	0.526	1.81	0.134
4000	1.31	0.055	0.923	0.023	0.764	0.014					5.16	1.72	3.57	0.673	2.07	0.172
4500	1.47	0.068	1.04	0.029	0.860	0.018	0.658	0.009					4.02	0.853	2.32	0.214
5000	1.64	0.084	1.15	0.034	0.955	0.022	0.731	0.011					4.47	1.04	2.58	0.262
6000	1.96	0.118	1.38	0.049	1.15	0.031	0.877	0.016	18"				5.36	1.47	3.10	0.373
7000	2.29	0.158	1.61	0.065	1.34	0.042	1.02	0.021	0.808	0.012			6.25	2.0	3.61	0.499
8000	2.62	0.204	1.84	0.085	1.53	0.054	1.17	0.027	0.924	0.015			7.15	2.59	4.13	0.650
9000	2.95	0.256	2.08	0.107	1.72	0.067	1.31	0.033	1.04	0.019					4.65	0.816
10 000	3.28	0.313	2.31	0.130	1.91	0.081	1.46	0.041	1.15	0.023	20"				5.16	0.992
12 000	3.93	0.447	2.77	0.184	2.29	0.114	1.75	0.057	1.38	0.032	1.11	0.019	24"		6.20	1.41
14 000	4.59	0.600	3.23	0.246	2.67	0.153	2.05	0.077	1.62	0.044	1.30	0.025			7.23	1.91
16 000	5.24	0.776	3.69	0.317	3.06	0.198	2.34	0.099	1.85	0.056	1.49	0.032	1.03	0.013	8.26	2.48
18 000	5.90	0.975	4.15	0.398	3.44	0.246	2.63	0.124	2.08	0.069	1.67	0.040	1.16	0.016		
20 000	6.55	1.19	4.61	0.487	3.82	0.302	2.92	0.152	2.31	0.084	1.86	0.049	1.28	0.020		
25 000	8.19	1.83	5.77	0.758	4.77	0.469	3.65	0.234	2.89	0.130	2.32	0.076	1.61	0.030		
30 000			6.92	1.08	5.73	0.669	4.38	0.332	3.46	0.183	2.79	0.108	1.93	0.043		
35 000			8.07	1.46	6.68	0.903	5.12	0.446	4.04	0.248	3.25	0.144	2.25	0.057		
40 000			9.23	1.90	7.64	1.17	5.85	0.578	4.62	0.319	3.72	0.186	2.57	0.074		
45 000			10.38	2.39	8.59	1.47	6.58	0.726	5.19	0.400	4.18	0.233	2.89	0.092		
50 000					9.55	1.81	7.31	0.888	5.77	0.491	4.64	0.284	3.21	0.113		
55 000							8.04	1.07	6.35	0.594	5.11	0.343	3.53	0.136		
60 000							8.77	1.27	6.93	0.708	5.58	0.411	3.86	0.161		
65 000							9.5	1.49	7.50	0.822	6.04	0.475	4.18	0.189		
70 000							10.2	1.70	8.08	0.955	6.51	0.552	4.50	0.216		
75 000							11.0	1.98	8.66	1.10	6.97	0.628	4.82	0.246		

VITESSE ET CHUTE DE PRESSION PAR 100 m DANS DES TUYAUX NPS 2
TABLE 2

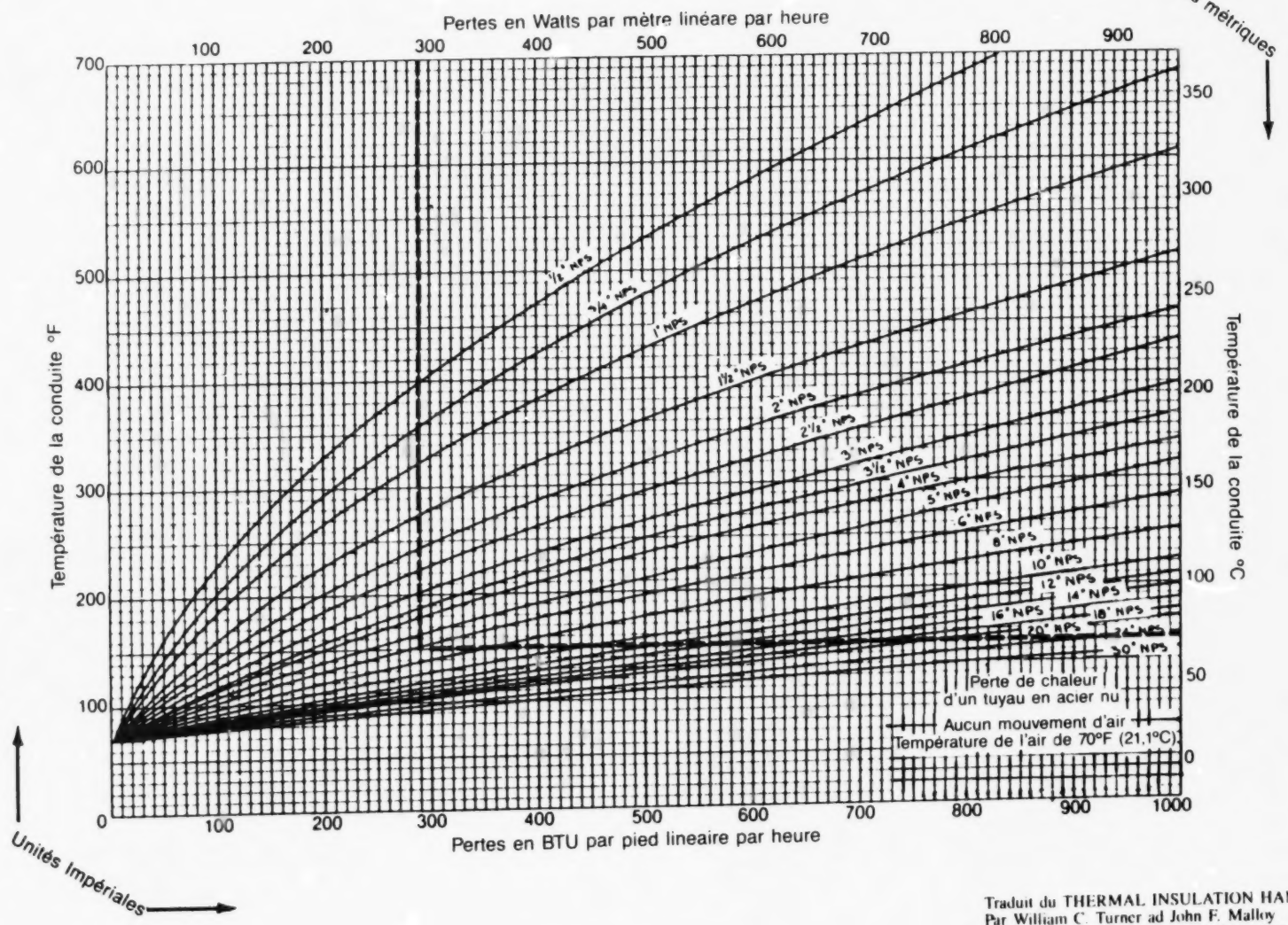
Debit d'eau L/s	Vitesse m/s	Chute de pression kPa(eff.)
0.5	0.23	11.6
0.666	0.30	82.7
0.833	0.38	53.9
1.0	0.46	25.5
1.17	0.53	99.8
1.333	0.616	10.2
1.5	0.693	11.5
1.666	0.770	14.1
2.5	1.15	29.5
3.333	1.54	51.2
4.166	1.92	77.3
5.0	2.311	10
5.83	32.691	47
6.66	3.081	92

PERTE PAR FROTTEMENT POUR L'EAU
TABLE 3
LONGUEUR EQUIVALENTE EN PIEDS D'UN TUYAU NEUF DROIT POUR VANNES ET ACCESSOIRES EN COULEMENT TURBULENT SEULEMENT

ACCESSOIRES			DIAMETRE DU TUYAU																			
			¼	⅜	½	¾	1	1¼	1½	2	2½	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	24
COUDE 90 STANDARD	A VISSER	ACIER	2.3	3.1	3.6	4.4	5.2	6.6	7.4	8.5	9.3	11	13										
		FONTE										9.0	11										
	A BRIDES	ACIER			.92	1.2	1.6	2.1	2.4	3.1	3.6	4.4	5.9	7.3	8.9	12	14	17	18	21	23	25	30
		FONTE										3.6	4.8		7.2	9.8	12	15	17	19	22	24	28
COUDE 90 A GR RAY	A VISSER	ACIER	1.5	2.0	2.2	2.3	2.7	3.2	3.4	3.6	3.6	4.0	4.6										
		FONTE										3.3	3.7										
	A BRIDES	ACIER			1.1	1.3	1.6	2.0	2.3	2.7	2.9	3.4	4.2	5.0	5.7	7.0	8.0	9.0	9.4	10	11	12	14
		FONTE										2.8	3.4		4.7	5.7	6.8	7.8	8.6	9.6	11	11	13
COUDE 45 STANDARD	A VISSER	ACIER	.34	.52	.71	.92	1.3	1.7	2.1	2.7	3.2	4.0	5.5										
		FONTE										3.3	4.5										
	A BRIDES	ACIER			.45	.59	.81	1.1	1.3	1.7	2.0	2.6	3.5	4.5	5.6	7.7	9.0	11	13	15	16	18	22
		FONTE										2.1	2.9		4.5	6.3	8.1	9.7	12	13	15	17	20
TE DÉBIT LINÉAIRE	A VISSER	ACIER	.79	1.2	1.7	2.4	3.2	4.6	5.6	7.7	9.3	12	17										
		FONTE										9.9	14										
	A BRIDES	ACIER			.69	.82	1.0	1.3	1.5	1.8	1.9	2.2	2.8	3.3	3.8	4.7	5.2	6.0	6.4	7.2	7.6	8.2	9.6
		FONTE										1.9	2.2		3.1	3.9	4.6	5.2	5.9	6.5	7.2	7.7	8.8
TE — DÉBIT DÉRIVÉ	A VISSER	ACIER	2.4	3.5	4.2	5.3	6.6	8.7	9.9	12	13	17	21										
		FONTE										14	17										
	A BRIDES	ACIER			2.0	2.6	3.3	4.4	5.2	6.6	7.5	9.4	12	15	18	24	30	34	37	43	47	52	62
		FONTE										7.7	10		15	20	25	30	35	39	44	49	57
COUDE DOUBLE 180	A VISSER	ACIER	2.3	3.1	3.6	4.4	5.2	6.6	7.4	8.5	9.3	11	13										
		FONTE										9.0	11										
	A BRIDE STANDARD	ACIER			.92	1.2	1.6	2.1	2.4	3.1	3.6	4.4	5.9	7.3	8.9	12	14	17	18	21	23	25	30
		FONTE										3.6	4.8		7.2	9.8	12	15	17	19	22	24	28
	A BRIDE GR RAY	ACIER			1.1	1.3	1.6	2.0	2.3	2.7	2.9	3.4	4.2	5.0	5.7	7.0	8.0	9.0	9.4	10	11	12	14
		FONTE										2.8	3.4		4.7	5.7	6.8	7.8	8.6	9.6	11	11	13
ROBINET A SOUPAPE	A VISSER	ACIER	21	22	22	24	29	37	42	54	62	79	110										
		FONTE										65	86										
	A BRIDES	ACIER			38	40	45	54	59	70	77	94	120	150	190	260	310	390					
		FONTE										77	99		150	210	270	330					
ROBINET VANNE	A VISSER	ACIER	.32	.45	.56	.67	.84	1.1	1.2	1.5	1.7	1.9	2.5										
		FONTE										1.6	2.0										
	A BRIDES	ACIER								2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
		FONTE										2.3	2.4		2.6	2.7	2.8	2.9	2.9	3.0	3.0	3.0	3.0
ROBINET D'ÉQUERRE	A VISSER	ACIER	12.8	15	15	15	17	18	18	18	18	18	18										
		FONTE										15	15										
	A BRIDES	ACIER			15	15	17	18	18	21	22	28	38	50	63	90	120	140	160	190	210	240	300
		FONTE										23	31		52	74	98	120	150	170	200	230	280
CLAPET À BATTANT	A VISSER	ACIER	7.2	7.3	8.0	8.8	11	13	15	19	22	27	38										
		FONTE										22	31										
	A BRIDES	ACIER			3.8	5.3	7.2	10	12	17	21	27	38	50	63	90	120	140					
		FONTE										22	31		52	74	98	120					
MANCHON OU RACCORD UNION	A VISSER	ACIER	.14	.18	.21	.24	.29	.36	.39	.45	.47	.53	.65										
		FONTE										.44	.52										
	ENTRÉE À CLOCHE	ACIER	.04	.07	.10	.13	.18	.26	.31	.43	.52	.67	.95	1.3	1.6	2.3	2.9	3.5	4.0	4.7	5.3	6.1	7.6
		FONTE										.55	.77		1.3	1.9	2.4	3.0	3.6	4.3	5.0	5.7	7.0
	ENTRÉE CARRÉE	ACIER	.44	.68	.96	1.3	1.8	2.6	3.1	4.3	5.2	6.7	9.5	13	16	23	29	35	40	47	53	61	76
		FONTE										5.5	7.7		13	19	24	30	36	43	50	57	70
	*	ACIER	.88	1.4	1.9	2.6	3.6	5.1	6.2	8.5	10	13	19	25	32	45	58	70	80	95	110	120	150
		FONTE										11	15		26	37	49	61	73	86	100	110	140
	FILTRE EN Y			4.6	5.0	6.6	7.7	18	20	27	29	34	42	53	61								
	AGRANDISSEMENT SOUDAIN		$h = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$ PIEDS DE LIQUIDE; SI $V_2 = 0$ $h = \frac{V_1^2}{2g}$ PIEDS DE LIQUIDE																				

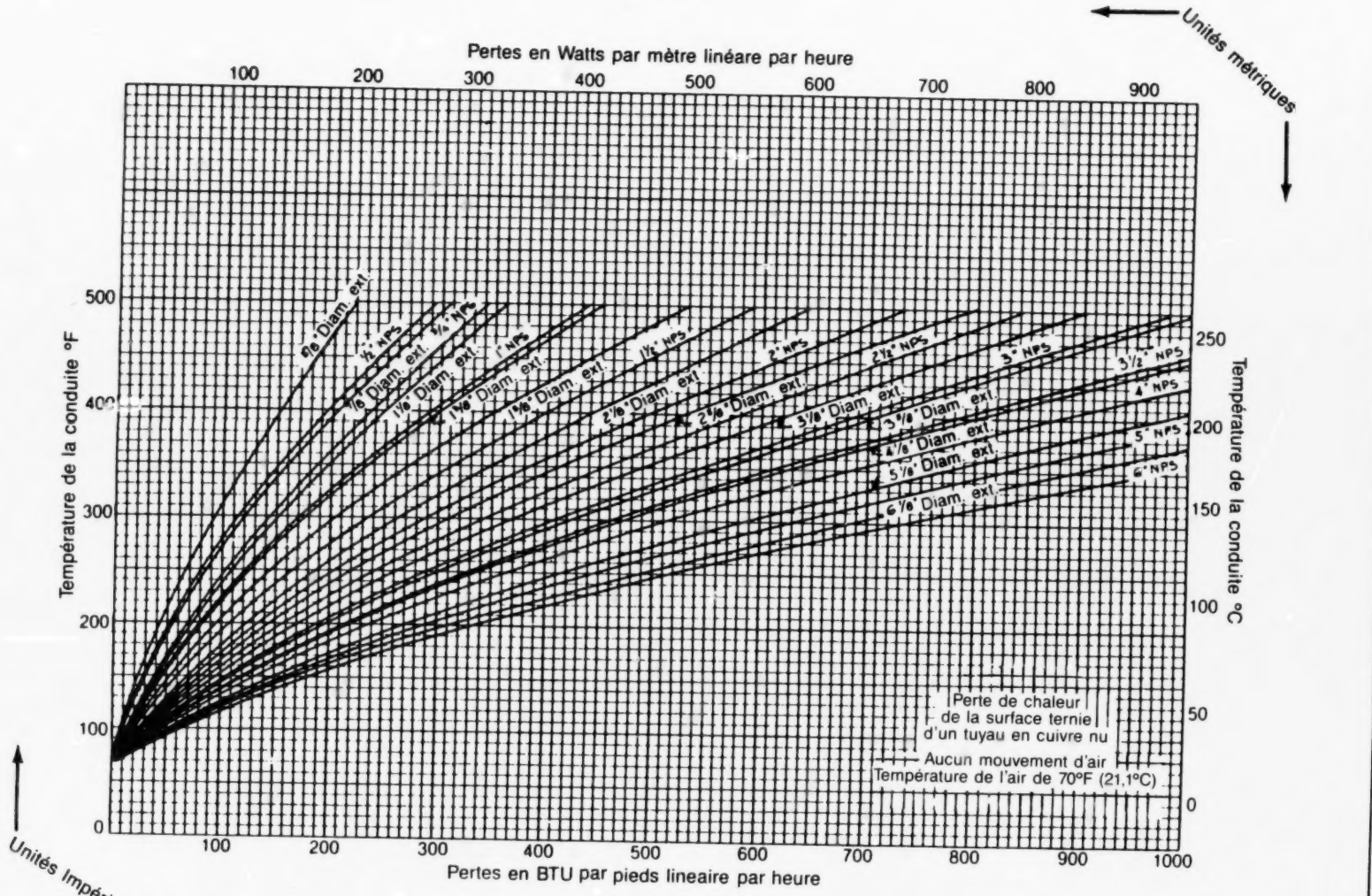
* ENTRÉE AVEC TUYAU À PROLONGEMENT INTERNE

TABLE 4



Traduit du THERMAL INSULATION HANDBOOK.
Par William C. Turner ad John F. Malloy
Éditeur: Robert E. Kreiger Publishing Company

TABLE 5



Traduit du THERMAL INSULATION HANDBOOK.
Par William C. Turner ad John F. Malloy
Éditeur: Robert E. Kreiger Publishing Company

FUITE D'AIR COMPRIMÉ TYPE
TABLE 6

Diàmetre du trou	Fuite d'air à 600 kPa(eff.)	Coût mensuel $0,05/kWh
1 mm	1 L/s	$ 10
3 mm	10 L/s	$ 111
5 mm	26,7 L/s	$ 298
10 mm	105 L/s	$1 182

DEBIT D'AIR UN TUYAU EN ACIER DE CALIBRE 40
TABLE 7

Traduit du Crane Co.

Air libre Mètres cubes par minute à 15°C et à 1.013 bars abs.	**Air comprimé** Mètres cubes par minute à 15°C et 7 bars eff.	**Chute de pression de l'air En bars par 100 mètres de tuyaux de calibre 40** Pour l'air à une pression effective de 7 bars et une température de 15°C								
		1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"
0.03	0.0038	0.093	0.021	0.0045						
0.06	0.0076	0.337	0.072	0.016	0.0051					
0.09	0.0114	0.719	0.154	0.033	0.011					
0.12	0.0152	1.278	0.267	0.058	0.018					
0.15	0.0190	1.942	0.405	0.087	0.027	0.0067	1"			
0.2	0.0253	3.357	0.698	0.146	0.047	0.011	0.0035			
0.3	0.0379	7.554	1.57	0.319	0.099	0.024	0.0073			
0.4	0.0506		2.71	0.548	0.170	0.041	0.012	1 1/4"		
0.5	0.0632		4.10	0.842	0.257	0.062	0.018			
0.6	0.0759		5.90	1.19	0.370	0.088	0.026	0.0066	1 1/2"	
0.7	0.0885		8.03	1.62	0.494	0.117	0.035	0.0086	0.0041	
0.8	0.101			2.12	0.634	0.150	0.044	0.011	0.0053	
0.9	0.114			2.64	0.803	0.187	0.055	0.014	0.0065	
1.0	0.126			3.26	0.991	0.231	0.067	0.017	0.0079	
1.25	0.158			4.99	1.55	0.353	0.102	0.026	0.012	2"
1.5	0.190			7.20	2.19	0.499	0.147	0.036	0.017	0.0048
1.75	0.221	2 1/2"		9.79	2.98	0.679	0.196	0.047	0.022	0.0064
2.0	0.253				3.82	0.871	0.257	0.062	0.029	0.0082
2.25	0.284	0.0042			4.84	1.10	0.325	0.076	0.036	0.010
2.5	0.316	0.0051			5.97	1.36	0.393	0.094	0.045	0.012
3.0	0.379	0.0073			8.6	1.92	0.565	0.135	0.063	0.018
3.5	0.442	0.0097	3"			2.61	0.754	0.184	0.086	0.024
4.0	0.506	0.012				3.41	0.984	0.236	0.110	0.030
4.5	0.569	0.016	0.0051			4.32	1.25	0.298	0.136	0.038
5.0	0.632	0.019	0.0063	3 1/2"		5.34	1.54	0.368	0.164	0.046
6	0.759	0.027	0.0090			7.68	2.17	0.518	0.236	0.066
7	0.885	0.036	0.012	0.0059			2.95	0.689	0.321	0.090
8	1.011	0.047	0.015	0.0075			3.85	0.900	0.419	0.115
9	1.138	0.058	0.019	0.0094			4.88	1.14	0.530	0.145
10	1.264	0.072	0.023	0.011	4"		6.02	1.41	0.640	0.179
11	1.391	0.085	0.028	0.014	0.0073		7.29	1.71	0.774	0.217
12	1.517	0.101	0.033	0.016	0.0085		8.67	2.02	0.921	0.252
13	1.643	0.119	0.039	0.019	0.0098			2.38	1.08	0.295
14	1.770	0.138	0.045	0.022	0.011			2.76	1.25	0.343
15	1.896	0.158	0.051	0.025	0.013			3.13	1.44	0.393
16	2.023	0.178	0.058	0.028	0.015			3.57	1.64	0.443
17	2.149	0.200	0.065	0.031	0.016			4.01	1.85	0.500
18	2.276	0.223	0.072	0.035	0.018	5"		4.49	2.07	0.558
19	2.402	0.247	0.081	0.039	0.020			5.01	2.31	0.618
20	2.528	0.266	0.089	0.043	0.022	0.0072		5.39	2.53	0.685
22	2.781	0.328	0.107	0.052	0.027	0.0086		6.65	3.07	0.825
24	3.034	0.388	0.126	0.061	0.032	0.010	6"	7.91	3.61	0.982
26	3.287	0.455	0.148	0.071	0.037	0.012		9.28	4.22	1.15
28	3.540	0.525	0.171	0.082	0.043	0.014	0.0054		4.86	1.33
30	3.793	0.603	0.197	0.094	0.049	0.016	0.0061		5.62	1.52
32	4.046	0.682	0.222	0.106	0.055	0.018	0.0069		6.39	1.73
34	4.298	0.770	0.251	0.119	0.062	0.020	0.0078		7.22	1.94
36	4.551	0.863	0.280	0.134	0.070	0.022	0.0087		8.09	2.17
38	4.804	0.957	0.312	0.148	0.077	0.024	0.0096			2.41
40	5.057	1.05	0.346	0.164	0.086	0.027	0.011			2.67
45	5.689	1.33	0.435	0.207	0.107	0.034	0.013	8"		3.36
50	6.321	1.65	0.534	0.254	0.132	0.042	0.016			4.15
60	7.585	2.37	0.765	0.363	0.188	0.059	0.023	0.0058		5.98
70	8.850	3.23	1.03	0.495	0.254	0.080	0.031	0.0077		8.14
80	10.11	4.22	1.35	0.639	0.332	0.104	0.040	0.010	10"	
90	11.38	5.34	1.70	0.808	0.418	0.130	0.051	0.013	0.0041	
100	12.64	6.59	2.10	0.992	0.513	0.160	0.062	0.015	0.0050	
110	13.91	7.97	2.54	1.19	0.621	0.192	0.075	0.019	0.0060	
120	15.17	9.49	3.02	1.42	0.739	0.228	0.089	0.022	0.0071	
130	16.43		3.55	1.67	0.862	0.267	0.103	0.026	0.0082	
140	17.70		4.12	1.93	1.00	0.308	0.120	0.029	0.0095	12"
150	18.96		4.73	2.22	1.15	0.353	0.138	0.034	0.011	0.0045
200	25.28		8.4	3.94	2.03	0.628	0.243	0.059	0.019	0.0078
250	31.61			6.16	3.17	0.975	0.378	0.090	0.029	0.012
300	37.93			8.88	4.56	1.40	0.540	0.129	0.041	0.017
350	44.25				6.21	1.90	0.735	0.174	0.056	0.023
400	50.57				8.11	2.48	0.960	0.227	0.072	0.030
450	56.89					3.14	1.215	0.286	0.091	0.037
500	63.21					3.88	1.50	0.352	0.112	0.046
550	69.53					4.69	1.82	0.424	0.134	0.055
600	75.85					5.58	2.16	0.504	0.160	0.066
650	82.17					6.55	2.54	0.592	0.188	0.076
700	88.50					7.60	2.94	0.686	0.218	0.089
750	94.82					8.72	3.38	0.788	0.248	0.101
800	101.1						3.84	0.896	0.282	0.115
850	107.5						4.34	1.01	0.319	0.130

PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR ET DE L'EAU SATURÉES (TEMPÉRATURE)

TABLE 8

Température		Press.	Volume, m^3/kg			Enthalpie, kJ/kg			Entropie, kJ/kg K		
°C	K	kPa	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur
t	T	P	v_f	v_{fg}	v_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
0.	273.15	0.6108	0.0010002	206.30	206.31	-0.04	2501.6	2501.6	-0.0002	9.1579	9.1577
0.01	273.16	0.6112	0.0010002	206.16	206.16	0.00	2501.6	2501.6	0.0000	9.1575	9.1575
1.0	274.15	0.6566	0.0010001	192.61	192.61	4.17	2499.2	2503.4	0.0153	9.1158	9.1311
2.0	275.15	0.7055	0.0010001	179.92	179.92	8.39	2496.8	2505.2	0.0306	9.0741	9.1047
3.0	276.15	0.7575	0.0010001	168.17	168.17	12.60	2494.5	2507.1	0.0459	9.0326	9.0785
4.0	277.15	0.8129	0.0010000	157.27	157.27	16.80	2492.1	2508.9	0.0611	8.9915	9.0526
5.0	278.15	0.8718	0.0010000	147.16	147.16	21.01	2489.7	2510.7	0.0762	8.9507	9.0269
6.0	279.15	0.9345	0.0010000	137.78	137.78	25.21	2487.4	2512.6	0.0913	8.9102	9.0015
7.0	280.15	1.0012	0.0010001	129.06	129.06	29.41	2485.0	2514.4	0.1063	8.8699	8.9762
8.0	281.15	1.0720	0.0010001	120.96	120.97	33.61	2482.6	2516.2	0.1213	8.8300	8.9513
9.0	282.15	1.1472	0.0010002	113.43	113.44	37.80	2480.3	2518.1	0.1362	8.7903	8.9265
10.0	283.15	1.2270	0.0010003	106.43	106.43	41.99	2477.9	2519.9	0.1510	8.7510	8.9020
12.0	285.15	1.4014	0.0010004	93.83	93.84	50.38	2473.2	2523.6	0.1805	8.6731	8.8536
14.0	287.15	1.5973	0.0010007	82.90	82.90	58.75	2468.5	2527.2	0.2098	8.5963	8.8060
16.0	289.15	1.8168	0.0010010	73.38	73.38	67.13	2463.8	2530.9	0.2388	8.5205	8.7593
18.0	291.15	2.0624	0.0010013	65.09	65.09	75.50	2459.0	2534.5	0.2677	8.4458	8.7135
20.0	293.15	2.337	0.0010017	57.84	57.84	83.86	2454.3	2538.2	0.2963	8.3721	8.6684
22.0	295.15	2.642	0.0010022	51.49	51.49	92.23	2449.6	2541.8	0.3247	8.2994	8.6241
24.0	297.15	2.982	0.0010026	45.92	45.93	100.59	2444.9	2545.5	0.3530	8.2277	8.5806
26.0	299.15	3.360	0.0010032	41.03	41.03	108.95	2440.2	2549.1	0.3810	8.1569	8.5379
28.0	301.15	3.778	0.0010037	36.73	36.73	117.31	2435.4	2552.7	0.4088	8.0870	8.4959
30.0	303.15	4.241	0.0010043	32.93	32.93	125.66	2430.7	2556.4	0.4365	8.0181	8.4546
32.0	305.15	4.753	0.0010049	29.57	29.57	134.02	2425.9	2560.0	0.4640	7.9500	8.4140
34.0	307.15	5.318	0.0010056	26.60	26.60	142.38	2421.2	2563.6	0.4913	7.8828	8.3740
36.0	309.15	5.940	0.0010063	23.97	23.97	150.74	2416.4	2567.2	0.5184	7.8164	8.3348
38.0	311.15	6.624	0.0010070	21.63	21.63	159.09	2411.7	2570.8	0.5453	7.7507	8.2962
40.0	313.15	7.375	0.0010078	19.545	19.546	167.45	2406.9	2574.4	0.5721	7.6861	8.2583
42.0	315.15	8.198	0.0010086	17.691	17.692	175.81	2402.1	2577.9	0.5987	7.6222	8.2209
44.0	317.15	9.100	0.0010094	16.035	16.036	184.17	2397.3	2581.5	0.6252	7.5590	8.1842
46.0	319.15	10.086	0.0010103	14.556	14.557	192.53	2392.5	2585.1	0.6514	7.4966	8.1481
48.0	321.15	11.162	0.0010112	13.232	13.233	200.89	2387.7	2588.6	0.6776	7.4350	8.1125
50.0	323.15	12.335	0.0010121	12.045	12.046	209.26	2382.9	2592.2	0.7035	7.3741	8.0776
52.0	325.15	13.613	0.0010131	10.979	10.980	217.62	2378.1	2595.7	0.7293	7.3138	8.0432
54.0	327.15	15.002	0.0010140	10.021	10.022	225.99	2373.2	2599.2	0.7550	7.2543	8.0093
56.0	329.15	16.511	0.0010150	9.158	9.159	234.35	2368.4	2602.7	0.7804	7.1955	7.9759
58.0	331.15	18.147	0.0010161	8.380	8.381	242.72	2363.5	2606.2	0.8058	7.1373	7.9431
60.0	333.15	19.920	0.0010171	7.678	7.679	251.09	2358.6	2609.7	0.8310	7.0798	7.9108
62.0	335.15	21.838	0.0010182	7.043	7.044	259.46	2353.7	2613.2	0.8560	7.0230	7.8790
64.0	337.15	23.912	0.0010193	6.468	6.469	267.84	2348.9	2616.6	0.8809	6.9667	7.8477
66.0	339.15	26.150	0.0010205	5.947	5.948	276.21	2343.9	2620.1	0.9057	6.9111	7.8168
68.0	341.15	28.563	0.0010217	5.475	5.476	284.59	2338.9	2623.5	0.9303	6.8561	7.7864
70.0	343.15	31.16	0.0010228	5.045	5.046	292.97	2334.0	2626.9	0.9548	6.8017	7.7565
72.0	345.15	33.96	0.0010241	4.655	4.656	301.36	2329.0	2630.3	0.9792	6.7478	7.7270
74.0	347.15	36.96	0.0010253	4.299	4.300	309.74	2324.0	2633.7	1.0034	6.6945	7.6979
76.0	349.15	40.19	0.0010266	3.975	3.976	318.13	2318.9	2637.1	1.0275	6.6418	7.6693
78.0	351.15	43.65	0.0010279	3.679	3.680	326.52	2313.9	2640.4	1.0514	6.5896	7.6410
80.0	353.15	47.36	0.0010292	3.408	3.409	334.92	2308.8	2643.8	1.0753	6.5380	7.6132
82.0	355.15	51.33	0.0010305	3.161	3.162	343.31	2303.8	2647.1	1.0990	6.4868	7.5858
84.0	357.15	55.57	0.0010319	2.934	2.935	351.71	2298.6	2650.4	1.1225	6.4362	7.5588
86.0	359.15	60.11	0.0010333	2.726	2.727	360.12	2293.5	2653.6	1.1460	6.3861	7.5321
88.0	361.15	64.95	0.0010347	2.535	2.536	368.53	2288.4	2656.9	1.1693	6.3365	7.5058
90.0	363.15	70.11	0.0010361	2.3603	2.3613	376.94	2283.2	2660.1	1.1925	6.2873	7.4799
92.0	365.15	75.61	0.0010376	2.1992	2.2002	385.36	2278.0	2663.4	1.2156	6.2387	7.4543
94.0	367.15	81.46	0.0010391	2.0509	2.0519	393.78	2272.8	2666.6	1.2386	6.1905	7.4291
96.0	369.15	87.69	0.0010406	1.9143	1.9153	402.20	2267.5	2669.7	1.2615	6.1427	7.4042
98.0	371.15	94.30	0.0010421	1.7883	1.7893	410.63	2262.2	2672.9	1.2842	6.0954	7.3796
100.0	373.15	101.33	0.0010437	1.6720	1.6730	419.06	2256.9	2676.0	1.3069	6.0485	7.3554

PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR ET DE L'EAU SATURÉES (TEMPÉRATURE)

TABLE 8

Température °C	Température K	Press. kPa	Volume, m^3/kg			Enthalpie, kJ/kg			Entropie, kJ/kg K		
			Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur
t	T	P	v_f	v_{fg}	v_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
100.0	373.15	101.33	0.0010437	1.6720	1.6730	419.06	2256.9	2676.0	1.3069	6.0485	7.3554
105.0	378.15	120.80	0.0010477	1.4182	1.4193	440.17	2243.6	2683.7	1.3630	5.9331	7.2962
110.0	383.15	143.27	0.0010519	1.2089	1.2099	461.32	2230.0	2691.3	1.4189	5.8203	7.2388
115.0	388.15	169.06	0.0010562	1.0352	1.0363	482.50	2216.2	2698.7	1.4733	5.7099	7.1832
120.0	393.15	198.54	0.0010606	0.8905	0.8915	503.72	2202.2	2706.0	1.5276	5.6017	7.1293
125.0	398.15	232.1	0.0010652	0.7692	0.7702	524.99	2188.0	2713.0	1.5813	5.4957	7.0769
130.0	403.15	270.1	0.0010700	0.6671	0.6681	546.31	2173.6	2719.9	1.6344	5.3917	7.0261
135.0	408.15	313.1	0.0010750	0.5807	0.5818	567.68	2158.9	2726.6	1.6869	5.2897	6.9766
140.0	413.15	361.4	0.0010801	0.5074	0.5085	589.10	2144.0	2733.1	1.7390	5.1894	6.9284
145.0	418.15	415.5	0.0010853	0.4449	0.4460	610.59	2128.7	2739.3	1.7906	5.0910	6.8815
150.0	423.15	476.0	0.0010908	0.3914	0.3924	632.15	2113.2	2745.4	1.8416	4.9941	6.8358
155.0	428.15	543.3	0.0010964	0.3453	0.3464	653.77	2097.4	2751.2	1.8923	4.8989	6.7911
160.0	433.15	618.1	0.0011022	0.3057	0.3068	675.47	2081.3	2756.7	1.9425	4.8050	6.7475
165.0	438.15	700.8	0.0011082	0.2713	0.2724	697.25	2064.8	2762.0	1.9923	4.7126	6.7048
170.0	443.15	792.0	0.0011145	0.2414	0.2426	719.12	2047.9	2767.1	2.0416	4.6214	6.6630
175.0	448.15	892.4	0.0011209	0.21542	0.21654	741.07	2030.7	2771.8	2.0906	4.5314	6.6221
180.0	453.15	1002.7	0.0011275	0.19267	0.19380	763.12	2013.2	2776.3	2.1393	4.4426	6.5819
185.0	458.15	1123.3	0.0011344	0.17272	0.17386	785.26	1995.2	2780.4	2.1876	4.3548	6.5424
190.0	463.15	1255.1	0.0011415	0.15517	0.15632	807.52	1976.7	2784.3	2.2356	4.2680	6.5036
195.0	468.15	1398.7	0.0011489	0.13969	0.14084	829.88	1957.9	2787.8	2.2833	4.1821	6.4654
200.0	473.15	1554.9	0.0011565	0.12600	0.12716	852.37	1938.6	2790.9	2.3307	4.0971	6.4278
205.0	478.15	1724.3	0.0011644	0.11386	0.11503	874.99	1918.8	2793.8	2.3778	4.0128	6.3906
210.0	483.15	1907.7	0.0011726	0.10307	0.10424	897.73	1898.5	2796.2	2.4247	3.9293	6.3539
215.0	488.15	2106.0	0.0011811	0.09344	0.09463	920.63	1877.6	2798.3	2.4713	3.8463	6.3176
220.0	493.15	2319.8	0.0011900	0.08485	0.08604	943.67	1856.2	2799.9	2.5178	3.7639	6.2817
225.0	498.15	2550.	0.0011992	0.07715	0.07835	966.88	1834.3	2801.2	2.5641	3.6820	6.2461
230.0	503.15	2798.	0.0012087	0.07024	0.07145	990.27	1811.7	2802.0	2.6102	3.6006	6.2107
235.0	508.15	3063.	0.0012187	0.06403	0.06525	1013.83	1788.5	2802.3	2.6561	3.5194	6.1756
240.0	513.15	3348.	0.0012291	0.05843	0.05965	1037.60	1764.6	2802.2	2.7020	3.4386	6.1406
245.0	518.15	3652.	0.0012399	0.05337	0.05461	1061.58	1740.0	2801.6	2.7478	3.3579	6.1057
250.0	523.15	3978.	0.0012513	0.04879	0.05004	1085.78	1714.7	2800.4	2.7935	3.2773	6.0708
255.0	528.15	4325.	0.0012632	0.04463	0.04590	1110.23	1688.5	2798.7	2.8392	3.1968	6.0359
260.0	533.15	4694.	0.0012756	0.04086	0.04213	1134.94	1661.5	2796.4	2.8848	3.1161	6.0010
265.0	538.15	5088.	0.0012887	0.03742	0.03871	1159.93	1633.5	2793.5	2.9304	3.0353	5.9658
270.0	543.15	5506.	0.0013025	0.03429	0.03559	1185.23	1604.6	2789.9	2.9763	2.9541	5.9304
275.0	548.15	5950.	0.0013170	0.03142	0.03274	1210.86	1574.7	2785.5	3.0222	2.8725	5.8947
280.0	553.15	6420.	0.0013324	0.02879	0.03013	1236.84	1543.6	2780.4	3.0683	2.7903	5.8586
285.0	558.15	6919.	0.0013487	0.02638	0.02773	1263.21	1511.3	2774.5	3.1146	2.7074	5.8220
290.0	563.15	7446.	0.0013659	0.02417	0.02554	1290.01	1477.6	2767.6	3.1611	2.6237	5.7848
295.0	568.15	8004.	0.0013844	0.02213	0.02351	1317.27	1442.6	2759.8	3.2079	2.5389	5.7469
300.0	573.15	8593.	0.0014041	0.020245	0.021649	1345.05	1406.0	2751.0	3.2552	2.4529	5.7081
305.0	578.15	9214.	0.0014252	0.018502	0.019927	1373.40	1367.7	2741.1	3.3029	2.3656	5.6685
310.0	583.15	9870.	0.0014480	0.016886	0.018334	1402.39	1327.6	2730.0	3.3512	2.2766	5.6278
315.0	588.15	10561.	0.0014726	0.015383	0.016856	1432.09	1285.5	2717.6	3.4002	2.1856	5.5858
320.0	593.15	11289.	0.0014995	0.013980	0.015480	1462.60	1241.1	2703.7	3.4500	2.0923	5.5423
325.0	598.15	12056.	0.0015289	0.012666	0.014195	1494.03	1194.0	2688.0	3.5008	1.9961	5.4969
330.0	603.15	12863.	0.0015615	0.011428	0.012989	1526.52	1143.6	2670.2	3.5528	1.8962	5.4490
335.0	608.15	13712.	0.0015978	0.010256	0.011854	1560.25	1089.5	2649.7	3.6063	1.7914	5.3979
340.0	613.15	14605.	0.0016387	0.009142	0.010780	1595.47	1030.7	2626.2	3.6616	1.6811	5.3427
345.0	618.15	15545.	0.0016858	0.008077	0.009763	1632.52	966.4	2598.9	3.7193	1.5636	5.2828
350.0	623.15	16535.	0.0017411	0.007058	0.008799	1671.94	895.7	2567.7	3.7800	1.4376	5.2177
355.0	628.15	17577.	0.0018085	0.006051	0.007859	1716.63	813.8	2530.4	3.8489	1.2953	5.1442
360.0	633.15	18675.	0.0018959	0.005044	0.006940	1764.17	721.3	2485.4	3.9210	1.1390	5.0600
365.0	638.15	19833.	0.0020160	0.003996	0.006012	1817.96	610.0	2428.0	4.0021	0.9558	4.9579
370.0	643.15	21054.	0.0022136	0.002759	0.004973	1890.21	452.6	2342.8	4.1108	0.7036	4.8144
371.0	644.15	21316.	0.0022778	0.002446	0.004723	1910.50	407.4	2317.9	4.1414	0.6324	4.7738
372.0	645.15	21562.	0.0023636	0.002075	0.004439	1935.57	351.4	2287.0	4.1794	0.5446	4.7240
373.0	646.15	21820.	0.0024963	0.001588	0.004084	1970.50	273.5	2244.0	4.2326	0.4233	4.6559
374.0	647.15	22081.	0.0028427	0.000623	0.003466	2046.72	109.5	2156.2	4.3493	0.1692	4.5185
374.15	647.30	22120.	0.00317	0.0	0.00317	2107.37	0.0	2107.4	4.4429	0.0	4.4429

PROPRIÉTES DE LA VAPEUR ET DE L'EAU SATURÉES (PRESSION)

TABLE 8

Press.	Temp.	Volume, m^3/kg			Enthalpie, kJ/kg			Entropie, kJ/kg K			Énergie, kJ/kg	
kPa	°C	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Vapeur
p	t	v_f	v_{fg}	v_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g	U_f	U_g
1.0	6.983	0.0010001	129.21	129.21	29.34	2485.0	2514.4	0.1060	8.87-6	8.9767	29.33	2385.2
1.1	8.380	0.0010001	118.04	118.04	35.20	2481.7	2516.9	0.1269	8.8149	8.9418	35.20	2387.1
1.2	9.668	0.0010002	108.70	108.70	40.60	2478.7	2519.3	0.1461	8.7640	8.9101	40.60	2388.9
1.3	10.866	0.0010003	100.76	100.76	45.62	2475.9	2521.5	0.1638	8.7171	8.8809	45.62	2390.5
1.4	11.985	0.0010004	93.92	93.92	50.31	2473.2	2523.5	0.1803	8.6737	8.8539	50.31	2392.0
1.5	13.036	0.0010006	87.98	87.98	54.71	2470.7	2525.5	0.1957	8.6332	8.8288	54.71	2393.5
1.6	14.026	0.0010007	82.76	82.77	58.86	2468.4	2527.3	0.2101	8.5952	8.8054	58.86	2394.8
1.8	15.855	0.0010010	74.03	74.03	66.52	2464.1	2530.6	0.2367	8.5240	8.7627	66.52	2397.4
2.0	17.513	0.0010012	67.01	67.01	73.46	2460.2	2533.6	0.2607	8.4639	8.7246	73.46	2399.6
2.2	19.031	0.0010015	61.23	61.23	79.81	2456.6	2536.4	0.2825	8.4077	8.6901	79.81	2401.7
2.4	20.433	0.0010019	56.39	56.39	85.67	2453.3	2539.0	0.3025	8.3563	8.6587	85.67	2403.6
2.6	21.737	0.0010021	52.28	52.28	91.12	2450.2	2541.3	0.3210	8.3089	8.6299	91.12	2405.4
2.8	22.955	0.0010024	48.74	48.74	96.22	2447.3	2543.6	0.3382	8.2650	8.6033	96.21	2407.1
3.0	24.100	0.0010027	45.67	45.67	101.00	2444.6	2545.6	0.3544	8.2241	8.5785	101.00	2408.6
3.5	26.694	0.0010033	39.48	39.48	111.85	2438.5	2550.4	0.3907	8.1325	8.5232	111.84	2412.2
4.0	28.983	0.0010040	34.80	34.80	121.41	2433.1	2554.5	0.4225	8.0510	8.4735	121.41	2415.3
4.5	31.035	0.0010046	31.14	31.14	129.99	2428.2	2558.2	0.4507	7.9827	8.4335	129.98	2418.1
5.0	32.898	0.0010052	28.19	28.19	137.77	2423.8	2561.6	0.4763	7.9197	8.3960	137.77	2420.6
5.5	34.605	0.0010058	25.77	25.77	144.91	2419.8	2564.7	0.4995	7.8626	8.3621	144.90	2422.9
6.0	36.183	0.0010064	23.74	23.74	151.50	2416.0	2567.5	0.5209	7.8134	8.3312	151.50	2425.1
6.5	37.651	0.0010069	22.015	22.016	157.64	2412.5	2570.2	0.5407	7.7622	8.3029	157.63	2427.0
7.0	39.025	0.0010074	20.530	20.531	163.38	2409.2	2572.6	0.5591	7.7176	8.2767	163.37	2428.9
7.5	40.316	0.0010079	19.238	19.239	168.77	2406.2	2574.9	0.5763	7.6760	8.2523	168.76	2430.6
8.0	41.534	0.0010084	18.104	18.105	173.86	2403.2	2577.1	0.5925	7.6370	8.2296	173.86	2432.3
9.0	43.787	0.0010094	16.203	16.204	183.28	2397.9	2581.1	0.6224	7.5657	8.1881	183.27	2435.3
10.	45.833	0.0010102	14.674	14.675	191.83	2392.9	2584.8	0.6493	7.5018	8.1511	191.82	2438.0
11.	47.710	0.0010111	13.415	13.416	199.68	2388.4	2588.1	0.6738	7.4439	8.1177	199.67	2440.5
12.	49.446	0.0010119	12.361	12.362	206.94	2384.3	2591.2	0.6963	7.3909	8.0872	206.93	2442.8
13.	51.062	0.0010126	11.465	11.466	213.70	2380.3	2594.0	0.7172	7.3420	8.0592	213.68	2445.0
14.	52.574	0.0010133	10.693	10.694	220.02	2376.7	2596.7	0.7367	7.2967	8.0334	220.01	2447.0
15.	53.997	0.0010140	10.022	10.023	225.97	2373.2	2599.2	0.7549	7.2544	8.0093	225.96	2448.9
16.	55.341	0.0010147	9.432	9.433	231.59	2370.0	2601.6	0.7721	7.2148	7.9869	231.58	2450.6
18.	57.826	0.0010160	8.444	8.445	241.99	2363.9	2605.9	0.8038	7.1424	7.9460	241.98	2453.9
20.	60.086	0.0010172	7.649	7.650	251.45	2358.4	2609.9	0.8321	7.0774	7.9094	251.43	2456.9
22.	62.162	0.0010183	6.994	6.995	260.14	2353.3	2613.5	0.8581	7.0184	7.8764	260.12	2459.6
24.	64.082	0.0010194	6.446	6.447	268.18	2348.6	2616.8	0.8820	6.9644	7.8464	268.16	2462.1
26.	65.871	0.0010204	5.979	5.980	275.67	2344.2	2619.9	0.9041	6.9147	7.8188	275.65	2464.4
28.	67.547	0.0010214	5.578	5.579	282.69	2340.0	2622.7	0.9248	6.8685	7.7933	282.66	2466.5
30.	69.124	0.0010223	5.228	5.229	289.30	2336.1	2625.4	0.9441	6.8254	7.7695	289.27	2468.6
35.	72.709	0.0010245	4.525	4.526	304.33	2327.2	2631.5	0.9878	6.7288	7.7166	304.29	2473.1
40.	75.886	0.0010265	3.992	3.993	317.65	2319.2	2636.9	1.0261	6.6448	7.6709	317.61	2477.1
45.	78.743	0.0010284	3.575	3.576	329.64	2312.0	2641.7	1.0603	6.5704	7.6307	329.59	2480.7
50.	81.345	0.0010301	3.239	3.240	340.56	2305.4	2646.0	1.0912	6.5035	7.5947	340.51	2484.0
55.	83.737	0.0010317	2.963	2.964	350.61	2299.3	2649.9	1.1194	6.4428	7.5623	350.56	2486.9
60.	85.954	0.0010333	2.731	2.732	359.93	2293.6	2653.6	1.1454	6.3873	7.5327	359.86	2489.7
65.	88.021	0.0010347	2.5335	2.5346	368.62	2288.3	2656.9	1.1696	6.3360	7.5059	368.55	2492.2
70.	89.959	0.0010361	2.3637	2.3647	376.77	2283.3	2660.1	1.1921	6.2883	7.4804	376.70	2494.5
75.	91.785	0.0010375	2.2158	2.2169	384.45	2278.6	2663.0	1.2131	6.2439	7.4570	384.37	2496.7
80.	93.512	0.0010387	2.0859	2.0870	391.72	2274.1	2665.8	1.2330	6.2022	7.4352	391.64	2498.8
90.	96.713	0.0010412	1.8682	1.8692	405.21	2265.6	2670.9	1.2696	6.1258	7.3954	405.11	2502.6
100.	99.632	0.0010434	1.6927	1.6937	417.51	2257.9	2675.4	1.3027	6.0571	7.3598	417.41	2506.1
110.	102.317	0.0010455	1.5482	1.5492	428.84	2250.8	2679.6	1.3330	5.9947	7.3277	428.73	2509.2
120.	104.808	0.0010476	1.4271	1.4281	439.36	2244.1	2683.4	1.3609	5.9375	7.2984	439.24	2512.1
130.	107.133	0.0010495	1.3240	1.3251	449.19	2237.8	2687.0	1.3868	5.8847	7.2715	449.05	2514.7
140.	109.315	0.0010513	1.2353	1.2363	458.42	2231.9	2690.3	1.4109	5.8356	7.2465	458.27	2517.2
150.	111.37	0.0010530	1.1580	1.1590	467.13	2226.2	2693.4	1.4336	5.7898	7.2234	466.97	2519.5
160.	113.32	0.0010547	1.0901	1.0911	475.38	2220.9	2696.2	1.4550	5.7467	7.2017	475.21	2521.7
180.	116.93	0.0010579	0.9762	0.9772	490.70	2210.8	2701.5	1.4944	5.6678	7.1622	490.51	2525.6
200.	120.23	0.0010608	0.8844	0.8854	504.70	2201.6	2706.3	1.5301	5.5967	7.1268	504.49	2529.2
220.	123.27	0.0010636	0.8088	0.8098	517.62	2193.0	2710.6	1.5627	5.5321	7.0949	517.39	2532.4
240.	126.09	0.0010663	0.7454	0.7465	529.63	2184.9	2714.5	1.5929	5.4728	7.0657	529.38	2535.4

PROPRIÉTES DE LA VAPEUR ET DE L'EAU SATURÉES (PRESSION)

TABLE 8

Press.	Temp.	Volume, m^3/kg			Enthalpie, kJ/kg			Entropie, kJ/kg K			Énergie, kJ/kg	
kPa	°C	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Vapeur
p	t	v_f	v_{fg}	v_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g	U_f	U_g
240.	126.09	0.0010663	0.7454	0.7465	529.6	2184.9	2714.5	1.5929	5.4728	7.0657	529.38	2535.4
260.	128.73	0.0010688	0.6914	0.6925	540.9	2177.3	2718.2	1.6209	5.4180	7.0389	540.68	2538.1
280.	131.20	0.0010712	0.6450	0.6460	551.4	2170.1	2721.5	1.6471	5.3678	7.0148	551.14	2540.6
300.	133.54	0.0010735	0.6045	0.6056	561.4	2163.2	2724.7	1.6716	5.3193	6.9909	561.11	2543.0
350.	138.87	0.0010789	0.5229	0.5240	584.3	2147.4	2731.6	1.7273	5.2119	6.9392	583.09	2548.2
400.	143.62	0.0010839	0.4611	0.4622	604.7	2133.0	2737.6	1.7764	5.1179	6.8943	604.24	2552.7
450.	147.92	0.0010885	0.4127	0.4138	623.2	2119.7	2742.9	1.8204	5.0343	6.8547	622.67	2556.7
500.	151.84	0.0010928	0.3736	0.3747	640.1	2107.4	2747.5	1.8604	4.9588	6.8192	639.57	2560.2
550.	155.47	0.0010969	0.3414	0.3425	655.8	2095.9	2751.7	1.8970	4.8900	6.7870	655.28	2563.3
600.	158.84	0.0011009	0.3144	0.3155	670.4	2085.0	2755.5	1.9308	4.8267	6.7575	669.76	2566.2
650.	161.99	0.0011046	0.29138	0.29249	684.1	2074.7	2758.9	1.9623	4.7681	6.7304	683.42	2568.7
700.	164.96	0.0011082	0.27157	0.27268	697.1	2064.9	2762.0	1.9918	4.7134	6.7052	696.29	2571.1
750.	167.78	0.0011116	0.25431	0.25543	709.3	2055.5	2764.8	2.0195	4.6621	6.6817	708.47	2573.3
800.	170.41	0.0011150	0.23914	0.24026	720.9	2046.5	2767.5	2.0457	4.6139	6.6596	720.04	2575.5
900.	175.38	0.0011213	0.21369	0.21481	742.6	2029.5	2772.1	2.0941	4.5250	6.6192	741.63	2578.8
1000.	179.88	0.0011274	0.19317	0.19429	762.6	2013.6	2776.2	2.1382	4.4446	6.5828	761.48	2581.9
1100.	184.07	0.0011331	0.17625	0.17738	781.1	1998.5	2779.7	2.1786	4.3711	6.5497	779.88	2584.5
1200.	187.96	0.0011386	0.16206	0.16320	798.4	1984.3	2782.7	2.2161	4.3033	6.5194	797.06	2586.9
1300.	191.61	0.0011438	0.14998	0.15113	814.7	1970.7	2785.4	2.2510	4.2403	6.4913	813.21	2589.0
1400.	195.04	0.0011489	0.13987	0.14072	830.1	1957.7	2787.8	2.2837	4.1814	6.4651	828.47	2590.8
1500.	198.29	0.0011539	0.13050	0.13166	844.7	1945.2	2789.9	2.3145	4.1261	6.4406	842.93	2592.4
1600.	201.37	0.0011586	0.12253	0.12369	858.6	1933.2	2791.7	2.3436	4.0739	6.4175	856.71	2593.8
1800.	207.11	0.0011678	0.10915	0.11032	884.6	1910.3	2794.8	2.3976	3.9775	6.3751	882.47	2596.3
2000.	212.37	0.0011766	0.09834	0.09954	908.6	1888.6	2797.2	2.4469	3.8898	6.3367	906.24	2598.2
2200.	217.24	0.0011850	0.08947	0.09065	931.0	1868.1	2799.1	2.4922	3.8093	6.3015	928.35	2599.6
2400.	221.78	0.0011932	0.08201	0.08320	951.9	1848.5	2800.4	2.5343	3.7347	6.2690	949.07	2600.7
2600.	226.04	0.0012011	0.07565	0.07686	971.7	1829.6	2801.4	2.5736	3.6651	6.2387	968.60	2601.5
2800.	230.05	0.0012088	0.07018	0.07139	990.5	1811.5	2802.0	2.6106	3.5998	6.2104	987.10	2602.1
3000.	233.84	0.0012163	0.06541	0.06663	1008.4	1793.9	2802.3	2.6455	3.5382	6.1837	1004.70	2602.4
3500.	242.54	0.0012345	0.05579	0.05703	1049.8	1752.2	2802.0	2.7253	3.3974	6.1228	1045.44	2602.4
4000.	250.33	0.0012521	0.04890	0.04975	1087.4	1712.9	2800.3	2.7965	3.2720	6.0685	1082.4	2601.3
4500.	257.41	0.0012691	0.04277	0.04404	1122.1	1675.6	2797.7	2.8612	3.1579	6.0191	1116.4	2599.9
5000.	263.91	0.0012858	0.03814	0.03943	1154.5	1639.7	2794.2	2.9206	3.0529	5.9735	1148.8	2597.0
5500.	269.93	0.0013023	0.03433	0.03563	1184.9	1605.0	2789.9	2.9757	2.9552	5.9309	1177.7	2594.0
6000.	275.55	0.0013187	0.03112	0.03244	1213.7	1571.3	2785.0	3.0273	2.8635	5.8908	1205.8	2590.4
6500.	280.82	0.0013350	0.026384	0.029719	1241.1	1538.4	2779.5	3.0759	2.7768	5.8527	1232.5	2586.3
7000.	285.79	0.0013513	0.026022	0.027373	1267.4	1506.0	2773.5	3.1219	2.6943	5.8162	1258.0	2581.8
7500.	290.50	0.0013677	0.023959	0.025327	1292.7	1474.2	2766.9	3.1657	2.6153	5.7811	1282.4	2577.0
8000.	294.97	0.0013842	0.022141	0.023525	1317.1	1442.8	2759.9	3.2076	2.5395	5.7471	1306.0	2571.7
9000.	303.31	0.0014179	0.019078	0.020495	1363.7	1380.9	2744.6	3.2867	2.3953	5.6820	1351.0	2560.1
10000.	310.96	0.0014526	0.016589	0.018041	1408.0	1319.7	2727.7	3.3605	2.2593	5.6198	1393.5	2547.3
11000.	318.05	0.0014887	0.014517	0.016006	1450.4	1258.7	2709.3	3.4304	2.1291	5.5595	1434.2	2533.2
12000.	324.65	0.0015268	0.012756	0.014283	1491.8	1197.4	2689.2	3.4972	2.0030	5.5002	1473.4	2517.8
13000.	330.83	0.0015672	0.011230	0.012797	1532.8	1135.0	2667.8	3.5616	1.8792	5.4408	1511.6	2500.6
14000.	336.64	0.0016106	0.009884	0.011495	1571.6	1070.7	2642.4	3.6242	1.7560	5.3803	1549.1	2481.4
15000.	342.13	0.0016579	0.008682	0.010340	1611.0	1004.0	2615.0	3.6859	1.6320	5.3178	1586.1	2459.9
16000.	347.33	0.0017103	0.007597	0.009308	1650.5	934.3	2584.9	3.7471	1.5060	5.2531	1623.2	2436.8
17000.	352.26	0.0017696	0.006601	0.008371	1691.7	859.9	2551.6	3.8107	1.3748	5.1855	1661.8	2409.3
18000.	356.96	0.0018399	0.005658	0.007498	1734.8	779.1	2513.9	3.8765	1.2362	5.1128	1701.7	2378.9
19000.	361.43	0.0019260	0.004751	0.006678	1778.7	692.0	2470.6	3.9429	1.0903	5.0332	1742.1	2343.8
20000.	365.70	0.0020370	0.003840	0.005877	1826.5	591.9	2418.4	4.0149	0.9263	4.9412	1785.7	2300.8
21000.	369.78	0.0022015	0.002822	0.005023	1884.3	461.3	2347.6	4.1048	0.7175	4.8223	1840.0	2242.1
22000.	373.69	0.0026714	0.001056	0.003728	2011..	184.5	2195.6	4.2847	0.2852	4.5799	1952.4	2113.8
22120.	374.15	0.00317	0.0	0.00317	2107.4	0.0	2107.4	4.4429	0.0	4.4429	2037.3	2037.3

PUISSANCE REQUISE POUR LE POMPAGE
TABLE 9

Litres par minute	Puissance théorique en kilowatts (kW) pour élever l'eau (à 15°C) à différentes hauteurs														
	Mètres														
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	45
20	0.007	0.013	0.020	0.026	0.033	0.039	0.046	0.052	0.059	0.065	0.082	0.098	0.114	0.131	0.147
40	0.013	0.026	0.039	0.052	0.065	0.078	0.091	0.105	0.118	0.131	0.163	0.196	0.229	0.261	0.294
60	0.020	0.039	0.059	0.078	0.098	0.118	0.137	0.157	0.176	0.196	0.245	0.294	0.343	0.392	0.441
80	0.026	0.052	0.078	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.235	0.261	0.327	0.392	0.457	0.523	0.588
100	0.033	0.065	0.098	0.131	0.163	0.196	0.229	0.261	0.294	0.327	0.408	0.490	0.572	0.653	0.735
120	0.039	0.078	0.118	0.157	0.196	0.235	0.274	0.314	0.353	0.392	0.490	0.588	0.686	0.784	0.882
140	0.046	0.091	0.137	0.183	0.229	0.274	0.320	0.366	0.412	0.457	0.572	0.686	0.800	0.915	1.029
160	0.052	0.105	0.157	0.209	0.261	0.314	0.366	0.418	0.470	0.523	0.653	0.784	0.915	1.045	1.176
180	0.059	0.118	0.176	0.235	0.294	0.353	0.412	0.470	0.529	0.588	0.735	0.882	1.029	1.176	1.323
200	0.065	0.131	0.196	0.261	0.327	0.392	0.457	0.523	0.588	0.653	0.817	0.980	1.143	1.307	1.470
250	0.082	0.163	0.245	0.327	0.408	0.490	0.572	0.653	0.735	0.817	1.021	1.225	1.429	1.633	1.838
300	0.098	0.196	0.294	0.392	0.490	0.588	0.686	0.784	0.882	0.980	1.225	1.470	1.715	1.960	2.205
350	0.114	0.229	0.343	0.457	0.572	0.686	0.800	0.915	1.029	1.143	1.429	1.715	2.001	2.287	2.573
400	0.131	0.261	0.392	0.523	0.653	0.784	0.915	1.045	1.176	1.307	1.633	1.960	2.287	2.614	2.940
450	0.147	0.294	0.441	0.588	0.735	0.882	1.029	1.176	1.323	1.470	1.838	2.205	2.573	2.940	3.308
500	0.163	0.327	0.490	0.653	0.817	0.980	1.143	1.307	1.470	1.633	2.042	2.450	2.859	3.267	3.675
600	0.196	0.392	0.588	0.784	0.980	1.176	1.372	1.568	1.764	1.960	2.450	2.940	3.430	3.920	4.410
700	0.229	0.457	0.686	0.915	1.143	1.372	1.601	1.829	2.058	2.287	2.859	3.430	4.002	4.574	5.145
800	0.261	0.523	0.784	1.045	1.307	1.568	1.829	2.091	2.352	2.614	3.267	3.920	4.574	5.227	5.880
900	0.294	0.588	0.882	1.176	1.470	1.764	2.058	2.352	2.646	2.940	3.675	4.410	5.145	5.880	6.615
1000	0.327	0.653	0.980	1.307	1.633	1.960	2.287	2.614	2.940	3.267	4.084	4.900	5.717	6.534	7.351
1250	0.408	0.817	1.225	1.633	2.042	2.450	2.859	3.267	3.675	4.084	5.105	6.125	7.146	8.167	9.188
1500	0.490	0.980	1.470	1.960	2.450	2.940	3.430	3.920	4.410	4.900	6.125	7.351	8.576	9.801	11.03
2000	0.653	1.307	1.960	2.614	3.267	3.920	4.574	5.227	5.880	6.534	8.167	9.801	11.43	13.07	14.70

Litres par minute	Mètres						
	50	55	60	70	80	90	100
20	0.163	0.180	0.196	0.229	0.261	0.294	0.327
40	0.327	0.359	0.392	0.457	0.523	0.588	0.653
60	0.490	0.539	0.588	0.686	0.784	0.882	0.980
80	0.653	0.719	0.784	0.915	1.045	1.176	1.307
100	0.817	0.898	0.980	1.143	1.307	1.470	1.633
120	0.980	1.078	1.176	1.372	1.568	1.764	1.960
140	1.143	1.258	1.372	1.601	1.829	2.058	2.287
160	1.307	1.437	1.568	1.829	2.091	2.352	2.614
180	1.470	1.617	1.764	2.058	2.352	2.646	2.940
200	1.633	1.797	1.960	2.287	2.614	2.940	3.267
250	2.042	2.246	2.450	2.859	3.267	3.675	4.084
300	2.450	2.695	2.940	3.430	3.920	4.410	4.900
350	2.859	3.144	3.430	4.002	4.574	5.145	5.717
400	3.267	3.594	3.920	4.574	5.227	5.880	6.534
450	3.675	4.043	4.410	5.145	5.880	6.615	7.351
500	4.084	4.492	4.900	5.717	6.534	7.351	8.167
600	4.900	5.390	5.880	6.861	7.841	8.821	9.801
700	5.717	6.289	6.861	8.004	9.147	10.29	11.43
800	6.534	7.187	7.841	9.147	10.45	11.76	13.07
900	7.351	8.086	8.821	10.29	11.76	13.23	14.70
1000	8.167	8.984	9.801	11.43	13.07	14.70	16.33
1250	10.21	11.23	12.25	14.29	16.33	18.38	20.42
1500	12.25	13.48	14.70	17.15	19.60	22.05	24.50
2000	16.33	17.97	19.60	22.87	26.14	29.40	32.67

CONVERSIONS COURANTES

1 baril (35 gal imp.) (42 gal U.S.)	= 159,1 litres
1 gallon (imp.)	= 1,20094 gallon (U.S.)
1 cheval vapeur (chaudière)	= 9809,6 watts
1 cheval vapeur	= 2545 Btu/heure
1 cheval vapeur	= 0,746 kilowatts
1 joule	= 1 N-m
Kelvin	= (°C + 273,15)
1 kilowatt-heure	= 3600 kilojoules
1 Newton	= 1 Kg-m/s^2
1 thermie	= 10^5 Btu
1 tonne (réfrigérant)	= 12002,84 Btu/heure
1 tonne (réfrigérant)	= 3516,8 watts
1 watt	= 1 joule/seconde
degré Rankine	= (°F + 459,67)

Cubes

1 v^3 = 27 pi^3

1 pi^3 = 1728 po^3

1 cm^3 = 1000 mm^3

1 m^3 = 10^6 cm^3

1 m^3 = 1000 L

Carrés

1 v^2 = 9 pi^2

1 pi^2 = 144 po^2

1 cm^2 = 100 mm^2

1 m^2 = 10000 cm^2

PRÉFIXES SI

Préfixe	Symbole	Valeur numérique	Exposant
téra	T	1 000 000 000 000	10^{12}
giga	G	1 000 000 000	10^9
méga	M	1 000 000	10^6
kilo	k	1 000	10^3
hecto	h	100	10^2
déca	da	10	10^1
déci	d	0,1	10^{-1}
centi	c	0,01	10^{-2}
milli	m	0,001	10^{-3}
micro	u	0,000 001	10^{-6}
nano	n	0,000 000 001	10^{-9}
pico	p	0,000 000 000 001	10^{-12}

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS MÉTRIQUES EN UNITÉS IMPÉRIALES

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
ampère/centimètre carré	A/cm^2	ampère/pouce carré	A/po^2	6,452
degré Celsius	°C	degré Fahrenheit	°F	(°C × 9/5) + 32
centimètre	cm	pouce	po	0,3937
centimètre cube	cm^3	pouce cube	po^3	0,06102
mètre cube	m^3	pied cube	pi^3	35,314
gramme	g	once	oz	0,03527
gramme	g	livre	lb	0,0022
gramme/litre	g/L	livre/pied cube	lb/pi^3	0,06243
joule	J	Btu	Btu	$9,480 \times 10^{-4}$
joule	J	pied-livre	pi-lb	0,7376
joule	J	cheval vapeur-heure	cv-h	$3,73 \times 10^{-7}$
joule/mètre, (Newton)	J/m, N	livre	lb	0,2248
kilogramme	kg	livre	lb	2,205
kilogramme	kg	tonne (longue)	tonne	$9,842 \times 10^{-4}$
kilogramme	kg	tonne (courte)	tn	$1,102 \times 10^{-3}$
kilomètre	km	mille	mille	0,6214
kilopascal	kPa	atmosphère	atm	$9,87 \times 10^{-3}$
kilopascal	kPa	pouce de mercure (32°F)	po de Hg	0,2953
kilopascal	kPa	pouce d'eau (4°C)	po d'H_2O	4,0147
kilopascal	kPa	livre/pouce carré	lb/po^2	0,1450
kilowatt	kW	pied-livre/seconde	pi-lb/s	737,6
kilowatt	kW	cheval vapeur	cv	1,341
kilowatt-heure	kWh	Btu	Btu	3413
litre	L	pied cube	pi^3	0,03531
litre	L	gallon (imp.)	gal (imp.)	0,21998
litre	L	gallon (U.S.)	gal (U.S.)	0,2642
litre/seconde	L/s	pied cube/minute	pi^3/min	2,1186
lumen/mètre carré	lm/m^2	lumen par pied carré	lm/pi^2	0,09290
lux, lumen/mètre carré	lx, lm/m^2	pied bougie	pi-b	0,09290
mètre	m	pied	pi	3,281
mètre	m	verge	yd	1,09361
partie par million	ppm	grain/gallon (imp.)	gr/gal (imp.)	0,07
partie par million	ppm	grain/gallon (U.S.)	gr/gal (U.S.)	0,05842
perméance (métrique)	PERM	perméance (imp.)	perm	0,01748
centimètre carré	cm^2	pouce carré	po^2	0,1550
mètre carré	m^2	pied carré	pi^2	10,764
mètre carré	m^2	verge carré	v^2	1,196
tonne (métrique)	t	livre	lb	2204,6
watt	W	Btu/heure	Btu/h	3,413
watt	W	lumen	lm	668,45

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS IMPÉRIALES EN UNITÉS MÉTRIQUES

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
ampère/po^2	A/po^2	ampère/cm^2	A/cm^2	0,1550
atmosphère	atm	kilopascal	kPa	101,325
British Thermal Unit	Btu	joule	J	1054,8
Btu	Btu	kilogramme-mètre	kg-m	107,56
Btu	Btu	kilowatt-heure	kWh	$2,928 \times 10^{-4}$
Btu/heure	Btu/h	watt	W	0,2931
calorie, gramme	cal ou	g-cal joule	J	4,186
chaîne	chaîne	mètre	m	20,11684
pied cube	pi^3	mètre cube	m^3	0,02832
pied cube	pi^3	litre	L	28,32
pied cube/minute	pi^3/m	litre/seconde	L/s	0,47195
cycle/seconde	c/s	Hertz	Hz	1,00
degré Fahrenheit	°F	degré Celsius	°C	(°F − 32)/1,8
pied	pi	mètre	m	0,3048
pied bougie	pi-b	lux, lumen/mètre carré	lx, lm/m^2	10,764
pied lambert	pi-L*	candela/mètre carré	cd/m^2	3,42626
pied-livre	pi-lb	joule	J	1,356
pied-livre	pi-lb	kilogramme-mètre	kg-m	0,1383
pied livre/seconde	pi-lb/s	kilowatt	kW	$1,356 \times 10^{-3}$
gallon (imp.)	gal (imp.)	litre	L	4,546
gallon (U.S.)	gal (U.S.)	litre	L	3,785
grain/gallon (imp.)	gr/gal(imp.)	partie par million	ppm	14,286
grain/gallon (U.S.)	gr/gal(U.S.)	partie par million	ppm	17,118
cheval vapeur	cv	watt	W	745,7
cheval vapeur-heure	cv-h	joule	J	$2,684 \times 10^6$
pouce	po	centimètre	cm	2,540
pouce de mercure (32°F)	po de Hg	kilopascal	kPa	3,386
pouce d'eau (4°C)	po d'H_2O	kilopascal	kPa	0,2491

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS IMPÉRIALES EN UNITÉS MÉTRIQUES (CONT.)

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
lambert	L*	candela/mètre carré	cd/m^2	3,183
lumen/pied carré	lm/pi^2	lumen/mètre carré	lm/m^2	10,76
lumen	lm	watt	W	0,001496
mille	mille	kilomètre	km	1,6093
once	oz	gramme	g	28,35
perm (0°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	$kg/(Pa\text{-}s\text{-}m^2)$ (PERM)	$5,721 \times 10^{-11}$
perm (23°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	$kg/(Pa\text{-}s\text{-}m^2)$ (PERM)	$5,745 \times 10^{-11}$
perm-pouce (0°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	$1,4532 \times 10^{-12}$
perm-pouce (23°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	$1,4593 \times 10^{-12}$
chopine (imp.)	chopine	litre	L	0,56826
livre	lb	gramme	g	453,5924
livre	lb	joule/mètre (Newton)	J/m N	4,448
livre	lb	kilogramme	kg	0,4536
livre	lb	tonne (métrique)	t	$4,536 \times 10^{-4}$
livre/pied cube	lb/pi^3	gramme/litre	g/L	16,02
livre/pouce carré	lb/po^2	kilopascal	kPa	6,89476
pinte	pinte	litre	L	1,1365
slug	slug	kilogramme	kg	14,5939
pied carré	pi^2	mètre carré	m^2	0,09290
pouce carré	po^2	centimètre carré	cm^2	6,452
verge carré	v^2	mètre carré	m^2	0,83613
tonne (longue)	ton	kilogramme	kg	1016
tonne (courte)	tn	kilogramme	kg	907,185
verge	v	mètre	m	0,9144

* "L" tel qu'utilisé dans l'éclairement.

Les valeurs typiques qui suivent peuvent servir de facteurs de conversion quand les données réelles manquent. Les équivalents en MJ et en BTU correspondent à la chaleur de combustion. Les chiffres applicables aux hydrocarbures correspondent à la valeur calorifique la plus élevée (poids humide). Certains produits sont de toute évidence des matières premières, mais ont été inclus au tableau pour le rendre plus complet et pour servir de référence. Les facteurs de conversion pour le charbon sont approximatifs puisque la valeur calorifique de ce produit varie selon la mine d'où il a été extrait.

TYPE D'ÉNERGIE	MÉTRIQUE	IMPÉRIAL
CHARBON		
— métallurgique	29 000 mégajoules/tonne	25,0 × 10^6 BTU/tonne
— anthracite	30 000 mégajoules/tonne	25,8 × 10^6 BTU/tonne
— bitumineux	32 100 mégajoules/tonne	27,6 × 10^6 BTU/tonne
— sous-bitumineux	22 100 mégajoules/tonne	19,0 × 10^6 BTU/tonne
— lignite	16 700 mégajoules/tonne	14,4 × 10^6 BTU/tonne
COKE		
— métallurgique	30 200 mégajoules/tonne	26,0 × 10^6 BTU/tonne
— pétrolier		
— brut	23 300 mégajoules/tonne	20,0 × 10^6 BTU/tonne
— calciné	32 600 mégajoules/tonne	28,0 × 10^6 BTU/tonne
POIX	37 200 mégajoules/tonne	32,0 × 10^6 BTU/tonne
PÉTROLE BRUT	38,5 mégajoules/litre	5,8 × 10^6 BTU/baril
MAZOUT N° 2	38,68 mégajoules/litre	5,88 × 10^6 BTU/baril 0,168 × 10^6 BTU/GI
PÉTROLE N° 4	40,1 mégajoules/litre	6,04 × 10^6 BTU/baril 0,173 × 10^6 BTU/GI
PÉTROLE N° 6 (MAZOUT LOURD C)		
— 2,5 % soufre	42,3 mégajoules/litre	6,38 × 10^6 BTU/baril 0,182 × 10^6 BTU/GI
— 1,0 % soufre	40,5 mégajoules/litre	6,11 × 10^6 BTU/baril 0,174 × 10^6 BTU/GI
— 0,5 % soufre	40,2 mégajoules/litre	6,05 × 10^6 BTU/baril 0,173 × 10^6 BTU/GI
KÉROSÈNE	37,68 mégajoules/litre	0,167 × 10^6 BTU/GI
DIESEL	38,68 mégajoules/litre	0,172 × 10^6 BTU/GI
GAZOLINE	36,2 mégajoules/litre	0,156 × 10^6 BTU/GI
GAZ NATUREL	37,2 mégajoules/m^3	1,00 × 10^6 BTU/M pi^3
PROPANE	50,3 mégajoules/kg 26,6 mégajoules/litre	0,02165 × 10^6 BTU/lb 0,1145 × 10^6 BTU/GI
ÉLECTRICITÉ	3,6 mégajoules/kWh	0,003413 × 10^6 BTU/kWh

Feuille de calcul de la pompe

Pompe N° _____

Projet _____ Endroit _____

Feuille de travail 12-1

Indiquer la pression et les élévations pour chaque pièce d'équipement

	Boucle	A	B
Pression d'aspiration			
Pression d'origine	kPa (abs.)	___	___
Pression statique (m x sg x 9,79)	kPa (eff.)	___	___
− Perte (Ligne + autre) △P	kPa (eff.)		
Pression d'aspiration de la pompe	kPa (abs.)		
Hauteur totale d'aspiration			
Pression statique	m	___	___
− Perte en ligne (kPa x 0.1022/sg) m		___	___
+ (Pr. d'or. − pr. de vap) (0.1022/sg) m		___	___
NPSH disponible	m		
Pression de refoulement			
Pression de livraison	kPa (abs.)	___	___
Pression statique	kPa (eff.)	___	___
Perte en ligne	kPa (eff.)	___	___
△P vannes de réglage	kPa (eff.)	___	___
△P échangeurs	kPa (eff.)	___	___
△P filtres	kPa (eff.)	___	___
△P orifices	kPa (eff.)	___	___
△P autres	kPa (eff.)		
Pression de refoulement de la pompe	kPa (abs.)		
Pression différentielle	kPa (abs.)	___	___
Pression de refoulement	kPa (abs.)	___	___
Pression d'aspiration	kPa (abs.)		
Charge totale △P	kPa (eff.)	___	___
Conversion en mètres	m		
Puissance de la pompe			
$\frac{m^3/h \times m \times sg}{367 \times (\text{eff. de la pompe})} = kW$			

Fiche technique

Liquide pompé

Température de pompage (T.P.) °C =

Viscosité @ T.P. cp =

Pression de vapeur @ T.P. max. kPa(abs.) =

Densité relative, sg @ T.P.

Débit normal @ 15 °C m^3/h =

Débit normal @ T.P. m^3/h =

Débit nominal @ T.P. m^3/h =

Remarques

Calcul simplifié pour fuites d'air

Feuille de travail 12-2

Entreprise: _____ Date : _____

Endroit: _____ Par : _____

Numéro de compresseur : _____

Débit d'air libre du compresseur _____ L/s (Q)
(indiqué sur la plaque signalétique)

1 Faire fonctionner le compresseur jusqu'à ce qu'il s'arrête

2 Inscrire le temps écoulé avant sa remise en marche

3 Inscrire l'heure à laquelle le compresseur s'est arrêté de nouveau

4 Répéter 4 fois

Cycle	Temps — départ/arrêt (T Secondes)	Temps — arrêt/départ (t Secondes)
1	.....	.....
2	.....	.....
3	.....	.....
4	.....	.....
Total	_____ s	_____ s

Moyenne $T = \frac{\text{Total}}{4} = \frac{___}{4} = ___ \text{ s}$ $t = \frac{\text{Total}}{4} = \frac{___ \text{ s}}{4} = ___ \text{ s}$

Fuite $= \frac{Q \times T}{T + t} = \frac{\text{x}}{+}$

$=$ L/s

Pour plus de renseignements sur les compresseurs, voir le Module 14, Compresseurs et turbines.

Perte de chaleur d'une conduite nue
feuille de travail 12-3

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par : _____

Diamètre de la conduite _____ m

Longueur de la conduite _____ m

Température du fluide _____ °C

Température ambiante (t) _____ °C

Débit (fw) _____ L/s

Perte de chaleur/mètre = _____ Consulter la Table 4 ou 5

Perte totale de chaleur = perte de chaleur/mètre × longueur

= _____ × _____

= _____ MJ

Énergie calorifique disponible d'un débit d'eau
(Méthode approximative)
Feuille de travail 12-4

Entreprise: _____ Date : _____

Endroit: _____ Par : _____

Ecoulement d'eau _____

Débit d'eau (f_w) _____ L/s

Témperature de l'eau d'entrée (t_1) _____ °C

Température de l'eau de sortie (t_2) _____ °C

Chaleur totale transférée (Q)

$$Q = fw \times (t_1 - t_2) \times 15 \text{ MJ/h}$$

$$= ____ \times (____ - ____) \times 15$$

$$= _____ \text{ MJ/h}$$

Énergie calorifique récupérable dans les effluents d'eau usée pour préchauffer de l'eau

(Méthode approximative)
Feuille de travail 12-5
Page 1 de 2

Entreprise: _____ Date : _____

Endroit: _____ Par : _____

Effluent d'eau usée : _____

Débit d'eau (fw) _____ L/s

Température actuelle de l'eau (t_1) _____ °C

Température proposée de l'eau (t_2) (Obtenir cette valeur du fabricant de l'échangeur de chaleur) _____ °C

Chaleur disponible $Q = fw \times (t_1 - t_2) \times 15$ MJ/h

$= ____ \times (\quad - \quad) \times 15$

$= ____$ MJ/h

or $\frac{____}{3600}$ MJ/s

$= ____$ MJ/s (1)

Efficacité proposée de l'échangeur de chaleur (obtenue du fabricant de l'échangeur de chaleur) _____%

Chaleur disponible = _____ MJ/s × _____%

= _____ MJ/s

Énergie calorifique récupérable dans les effluents d'eau usée pour préchauffer de l'eau

(méthode approximative)
Feuille de travail 12-5
Page 2 de 2

Entreprise: _____ Date : _____

Endroit: _____ Par : _____

Ecoulement du procédé

Débit d'eau (fw) _____ L/s

Température de l'eau d'arrivée (t_1) _____ °C

Température de l'eau requise (t_2) _____ °C

Chaleur nécessaire $Q = fw \times (t_1 - t_2) \times 15$

$= ____ \times (\quad - \quad) \times 15$

$= - ____$ MJ/h

ou $= \dfrac{____}{3600}$ MJ/h (ne pas tenir compte du signe négatif)

$= ____$ MJ/s (2)

Diminution de l'énergie calorifique nécessaire au chauffage de l'eau pour procédés

= (2) MJ/s − (1) MJ/s

= _____ − _____

= _____ MJ/s (3)

Remarque : la feuille de travail 12-5 peut être utilisée également pour les réseaux de distribution d'eau de refroidissement. Dans ce cas, la valeur (1) sera négative, ce qui démontre la capacité d'absorber de l'énergie calorifique. Le signe négatif est abandonné pour le reste des calculs.

Besoins de vapeur pour chauffer l'eau dans un échangeur de chaleur vapeur/eau

(Méthode approximative)
Feuille de travail 12-6
Page 1 de 2

Entreprise: _____ Date : _____

Endroit: _____ Par : _____

Vapeur

Pression	_____	kPa (eff.)	
Température	_____	°C	
Enthalpie	_____	kJ/kg	(1)

Condensat

Pression	_____	kPa(eff.)	
Température	_____	°C	
Enthalpie	_____	kJ/kg	(2)

Chaleur disponible de la vapeur = (1) − (2) kJ/kg

= _____ − _____ kJ/kg

= _____ kJ/kg (3)

Efficacité de l'échangeur de chaleur (obtenue du fabricant de l'échangeur de chaleur) _____ % (4)

Chaleur disponible pour l'eau pour procédés = (3) × (4) kJ/kg

= _____ × _____

= _____ kJ/kg

ou $\frac{\text{_____}}{1000}$ kJ/kg / kJ/MJ

= _____ MJ/kg (5)

Vapeur requise par la vapeur de procédé (sans récupération de chaleur) = $\frac{\text{feuille de travail 12-5(3)}}{\text{feuille de travail 12-6(5)}}$

= _____ MJ/s / MJ/kg

= _____ kg/s (6)

Besoins de vapeur pour chauffer l'eau dans un échangeur de chaleur vapeur/eau
(Méthode approximative)
Feuille de travail 12-6
Page 2 de 2

Entreprise: _____ Date : _____

Endroit: _____ Par : _____

Vapeur requise par l'eau de procédé (avec récupération de chaleur) = $\frac{\text{feuille de travail 12-5 (2)}}{\text{feuille de travail 12-6 (5)}}$

= _____ MJ/s / MJ/kg

_____ kg/s (7)

Diminution de la consommation de vapeur imputable à la récupération de chaleur des eaux usées = (6) − (7)

= _____ − _____

= _____ kg/s (8)

Heures d'exploitation par année = _____ h (9)

Diminution de la consommation annuelle de vapeur imputable à la récupération de la chaleur = (8) × (9) × 3600

= _____ × _____ × 3600

= _____ kg/an (10)

Coût de la vapeur = $ _____ /1000 kg (11)

Economies annuelles = (10) × (11)

= $ _____ par année (12)

Coût de l'équipment de récupération de la chaleur et de l'installation = $ _____ (13)

Période de rentabilité = $\frac{(13)}{(12)}$

= _____ années